“十三五”普通高等院校规划教材

工程训练

GONGCHENG XUNLIAN



——金工训练

主　编　钟晓峰　傅彩明　李　恩　杨金林

副主编　王雪峰　彭文静　周建宇　刘伟成

赵　曜　刘　平　邹俊辉　潘翔伟

张小玲　康铁鑫　徐家富　高　阳

吕　硕　洪志定　应　帅

UESTCP 电子科技大学出版社



金工训练是高等学校工科专业一门实践性较强的技术基础课程。通过本课程的学习，能使学生认知和了解机械制造工艺的发展历程和常用的机械制造工艺手段、典型机械零件的加工方法和机械制造领域的最新进展。同时，同学学生们在进行实际训练后，能够对常用加工机床有初步了解，并能对简单机械零件进行工艺分析、材料选择、毛坯成型，利用常用加工工具和量具实现机械加工、成品检测等一系列生产流程。最后结合创新思维和创新能力的培养，能够开拓学生的工程素养、培养学生的创新意识和动手能力，为培养满足社会需求和创新需求的综合型人才打下基础。

随着现代制造技术的不断进步，新的制造方法和加工理念不断涌现，传统的金工实习课程内容已不足以体现机械制造技术领域的进步。同时，随着国家“大众创新、万众创业”战略的实施，如何在金工实习教学过程中锻炼学生的创新能力，鼓励学生在实习过程中发挥创新精神，是目前金工实习教学亟需解决的问题。近年来，各高等学校均在强化金工实习的课程建设，投入了大量的人力物力改善金工实习基地的设备，增加了大量的先进制造装备。但反映到实际的教学过程中，仍然是以传统的金工实习基础教学为主，先进制造装备更多的限于演示教学和参观教学。对应的金工实习教材，亦同样缺乏此方面的变化。

为适应本科金工实习课程向工程训练转换，我们编写了本教材，其目的是为帮助学生在进行金工训练时，从了解和正确选择机械工程材料开始，掌握量具的正确使用方法和机械零件的质量检测方法；了解切削加工过程中材料的转变过程；掌握基础的铸造、锻造、焊接、车工、钳工、铣工、磨削、刨削加工的工艺过程；了解快速成型、数控车、数控铣、加工中心、特种加工等先进加工方法和先进制造理念；最后了解和

掌握系统的创新理论和创新方法。从而使学生通过理论学习和实践操作，了解机械加工领域的发展历程和最新进展，加深专业课程的学习效果，对实际的生产过程有所认知，为后继课程的学习和今后的工作打下一定的实践基础。为体现目前企业的实际生产现状和适应OBE人才培养目标的需要，本教材在传统训练项目之外，增加了各种先进制造技术的讲述，同时增加了创新训练的有关章节，希望能够对选择本教材的学生有所帮助。

本书由钟晓锋、傅彩明、李恩、杨金林统稿并担任主编。本书得到了各级部门有关领导及工程训练中心全体同仁的大力支持和热忱帮助，特此致谢！

由于编者水平有限，书中难免有欠妥或错误之处，敬请批评指正。

编　者

2016年8月

目录 CONTENTS

第一篇　工程材料与切削加工基础

第二篇　材料成型基础

第三篇 传统机械加工

第四篇 数控技术

第一篇

工程材料与切削加工基础



第1章　机械工程材料基础

教学目的和要求：在现代工业体系中，材料科学的作用举足轻重。材料性能的优劣直接决定了相关产品性能的好坏。一个合格的机械工程技术人员应该掌握基本的机械工程材料基础知识，只有充分了解材料的力学性能、化学性能以及工艺加工性能，才能根据实际情况，合理地选用材料、经济地规划工艺，生产出经济合格的产品。本章分别讲述金属材料基础知识和常用机械工程材料基础知识，使学生了解金属材料的结构、钢的热处理方法的原理、分类及应用，掌握常用的机械工程材料的分类、性能和选择、应用方法。



1.1　机械工程材料概述

机械工程材料，按用途可以分为结构材料和功能材料。结构材料是用以提供机械基础的力学性能的材料，需要满足机械产品的强度、硬度、塑性、冲击韧性等力学性能；而功能材料用以提供机械的功能，以声、光、电、磁、热等物理、化学性能为主。本章主要以介绍结构材料为主。

机械工程材料按成分可分为金属材料和非金属材料，其中金属材料是目前制造业使用最为广泛的材料，它具有许多优良的综合性能，如物理性能、化学性能、力学性能、工业性能等，因此广泛应用于现代科技和日常生活中，可采用各种加工方法制成各种形状和性能的零件。因此，本章以一节的篇幅重点介绍金属材料分类、结构、成分、热处理等基础知识，另一节则整体介绍常用的机械工程材料相关知识，使同学们对常用的机械工程材料有一个基础认知，方便后续加深学习。



1.2　金属材料基础认知

1.2.1　金属材料的结构

1. 金属的晶体结构

根据原子在空间中排列方式的不同，自然界中的固体物质可以分为两种。

（1）原子在空间中不规则排列所形成的物体，称为非晶体。如玻璃、松香等物体都是非晶体；

（2）原子在空间中规则排列所形成的物体，称为晶体。一般情况下，金属材料都

是晶体。

晶体中原子的分布和排列方式称为晶体结构，它对金属材料的性能起着重要作用。因此，为了了解金属材料的性能，必须首先研究金属材料的晶体结构。在金属材料晶体中，金属原子按照一定的规律重复排列，如果我们把其中每个原子抽象为空间中的一个点，并用假象的直线将每个点连接起来，使之形成空间网格，则该网格被称为晶格，原子所占据的点称为结点。由于组成金属晶格的元素不同，晶格的结构也不相同，常见的有三种形式，如表 1－1 所示。

表 1－1　常见金属及其晶格形式

晶格类型	常见金属	晶格与晶胞示意图
体心立方晶格	属于这种晶格类型的金属有：α-Fe、(912℃以下的纯铁)、铬（Cr）、钼（Mo）、钨（W）、钒（V）等。这类金属具有较好的强度和塑性	
面心立方晶格	属于这种晶格类型的金属有：γ-Fe（温度在 912 ~ 1394℃ 的纯铁）、铝（Al）、铜（Cu）、金（Au）、银（Ag）、镍（Ni）等。这类金属的塑性都很好	
密排六方晶格	属于这种晶格类型的金属有：铍（Be）、镁（Mg）、锌（Zn）、α－钛（Ti）、β-铬（Cr）及α-钴（Co）等	

由于金属晶体内部原子按照一定的规律整齐排列，导致其晶体表现出以下特点。

（1）金属晶体具有一定的熔点。例如 Fe 的熔点为 1538℃、Cu 的熔点为 1083℃、Al 的熔点为 660℃。而非晶体没有固定熔点。

（2）金属晶体具有各向异性。由于金属原子在晶格中的排列位置关系，沿晶格对角线方向的金属性能和沿晶格单边方向的金属晶体性能具有显著差异。

（3）金属晶体具有规则的几何外形。当液态金属向金属晶体变化时，若金属原子在堆积的过程中不受阻碍，则可以形成有规则的几何外形。

2. 合金及其结构

虽然纯金属具有良好的导电性、导热性和塑性，但由于纯金属制取较为困难，价格较高，同时其机械性能，如强度、硬度及耐磨性普遍较差，因此工业应用时更多以合金为主。

在一种金属元素中加入另外的元素（可以加入一种或多种元素、金属元素或非金属元素）所形成的具有金属特性的物质称为合金。在实际应用中，通过改变组成合金元素的成分，可以显著改变合金材料的性能，使其除了具备纯金属的基本性能外，还具备比纯金属更好的机械性能或其他特殊性能。例如工业上常用的碳素钢就是铁和碳

两种元素为主形成的合金，其不但具备纯铁的导电、导热等性能，还同时拥有更好的力学性能，因此被广泛应用于生产生活的方方面面。

组成合金的元素称为组元，由两种组元组成的合金称为二元合金，由三种组元组成的合金称为三元合金，以此类推。合金的结构比纯金属更加复杂，按照各组元原子的存在方式不同，可以将合金分为两大类，即固溶体和金属化合物。

（1）固溶体　在固态下组元互相溶解而形成的均匀的合金称为固溶体。在固溶体中，组成元素占比较高的组元称为溶剂，占比较低的组元称为溶质。由于溶质原子在固溶体晶格中存在的位置不同，可以将固溶体分为间隙固溶体和置换固溶体。当溶质原子存在于溶剂原子形成的晶格的间隙内时，这种固溶体称为间隙固溶体。若溶质原子直接和溶剂原子直接之比小于 0.59 时，易形成此类固溶体。当溶质原子占据溶剂晶格结点位置时，即溶质原子将原结点处的溶剂原子置换了，这种固溶体称为置换固溶体。若溶质原子直接和溶剂原子直接之比在 0.85~1.15 时，易形成此类固溶体。

（2）金属化合物　当组成合金的元素原子结构和性能相差较大以及溶质元素量超过固溶体的溶解度时，合金各组元之间相互作用而生成金属化合物。金属化合物既可以由金属和金属元素组成，也可以由金属和非金属元素组成。例如铁碳合金中铁和碳可以组成晶格复杂的碳化物——渗碳体（Fe_3C）。由于金属化合物的结构复杂，滑移系、滑移面和滑移方向少，所以金属化合物很少能够进行塑性变形，脆性很大。

3. 铁碳合金

钢铁是现代工业中应用最广泛的金属材料，其基本组成元素是铁和碳，故钢铁又被统称为铁碳合金。

合金的结构远比纯金属复杂。为了更好地研究和使用合金，就必须了解合金中各种组织与成分之间的变化规律。合金状态图就是研究这些规律的有效工具。合金状态图是通过实验制作出来的。它用图解的方法表示合金的状态、组织、温度和成分之间的变化规律。最为典型的是铁碳合金状态图，如图 1－1 所示。

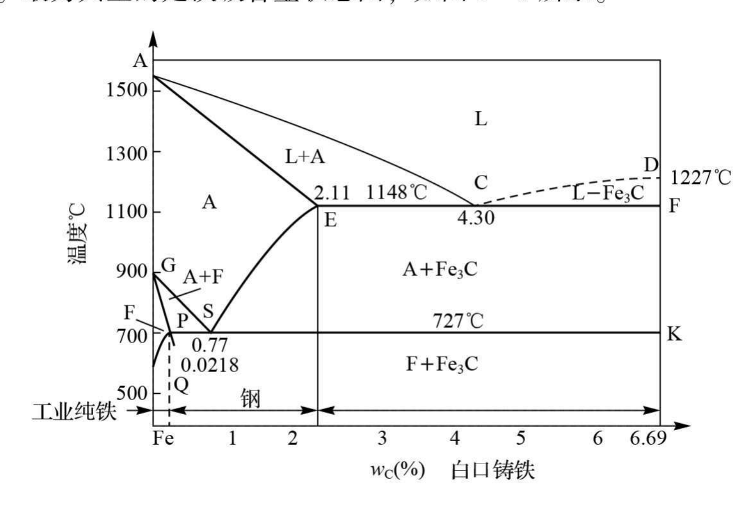


图 1－1　铁碳合金状态图

（1）铁碳合金的基本组织（如表 1－2 所示）

表 1－2　铁碳合金的基本组织、结构类型及性能特点

基本组织	结构类型	性能特点
铁素体	铁溶于 α－Fe 中形成的间隙固溶体。常用符号 F 或 α 表示	它仍保持 α－Fe 的体心立方晶格。碳在 α－Fe 的溶解度很小，在 727℃时的溶解度为 ω_c＝0.0218%。随着温度的降低，碳在 α－Fe 中的溶解度下降，在室温时只能溶解微量的碳，因此其性能接近于纯铁，塑性、韧性较好，强度、硬度较低。可用于冷变形加工
奥氏体	碳溶于 γ－Fe 中形成的间隙固溶体。常用符号 A 或 γ 表示	它仍保持 γ－Fe 的面心立方晶格。由于面心立方晶格的间隙较大，因而奥氏体的溶碳能力较强，在 1148℃时可溶碳 ω_c＝2.11%，在 727℃时能溶碳 ω_c＝0.77%。奥氏体的强度、硬度较低，塑性很好，适于压力加工。钢大多数加热到奥氏体温区进行锻造
渗碳体	铁于碳形成的金属化合物 Fe_3C	它具有不同于铁和碳的复杂晶体结构，其含碳量为 ω_c＝6.69%。渗碳体的硬度很高，脆性很大，塑性、韧性极差。渗碳体在钢中主要起强化作用，随着钢中含碳量的增加，渗碳体的数量增多，钢的强度、硬度提高，而塑性和韧性下降
珠光体	铁素体和渗碳体组成的机械混合物，用符号 P 表示	珠光体中软而韧的铁素体和硬的渗碳体层片相间，使珠光体具有较高的强度，又有较好的塑性和韧性，其综合力学性能较好

（2）铁碳合金的分类及其组织转变过程

1）铁碳合金的分类

根据铁碳合金状态图，ω_c>2.11%的铁碳合金为铁，ω_c<2.11%的为钢。其中钢分为：亚共析钢— ω_c 在 0.0218%～0.77%之间；共析钢— ω_c 为 0.77%；过共析钢— ω_c在 0.77%～2.11%之间。白口铁可分为：亚共晶白口铁— ω_c 在 2.11%～4.3%之间；共晶白口铁— ω_c 为 4.3%；过共晶白口铁— ω_c 在 4.3%～6.69%之间。

2）铁碳合金的组织转变过程

现以 ω_c 为 0.4%、0.77%、1.2%的三种钢为例，说明在缓慢冷却过程中钢的组织转变过程。

ω_c 为 0.4%的亚共析钢，在高温时组织为奥氏体，冷却到 GS 线时，开始析出铁素体。当冷却到 PSK 线时，发生共析转变，余下的奥氏体全部转变为珠光体。因此，亚共析钢在室温时的组织为铁素体和珠光体。ω_c 为 0.77%的共析钢高温组织为单一奥氏体，冷却到 S 点时，奥氏体发生共析转变，全部转变为珠光体。故室温时共析钢的组织为珠光体。ω_c 为 1.2%的过共析钢在高温时组织也为单一奥氏体，当冷却到 ES 线时，开始从奥氏体中析出渗碳体。随着温度的下降，析出的渗碳体增加，余下的奥氏体减少。当冷却到 PSK 线时，发生共析转变，剩余的奥氏体转变为珠光体。因此室温下过共析钢的组织为渗碳体和珠光体。

用分析钢的方法可同样分析白口铁的组织变化。室温时亚共晶白口铁的组织为珠光体、二次渗碳体和莱氏体；共晶白口铁的组织为珠光体和渗碳体，过共晶白口铁的组织为一次渗碳体和莱氏体。

在 1148℃～727℃的冷却过程中，由于奥氏体中碳的溶解度不断减少，所以在此温度区要从奥氏体中不断析出渗碳体。为区别直接从液态合金中析出的渗碳体和从奥氏

体中析出的渗碳体，把前者称为一次渗碳体，后者称为二次渗碳体。

1.2.2 钢的常用热处理

在机械零件制造过程中，为了提高和获得金属材料的物理、化学以及力学性能，人们常常采取一定的工艺方法，通过对材料的表面或内部进行加工处理，从而获得与基体材料不同的各种特性。

其中，将固态金属或合金，采用适当的方式进行加热、保温和冷却，改变材料内部组织结构，从而获得改善材料性能的工艺，这种方式称之为金属材料的热处理。其工艺过程通常可以用温度-时间坐标的工艺曲线来表示。钢常用的各种热处理工艺规范如图 1-2 所示。

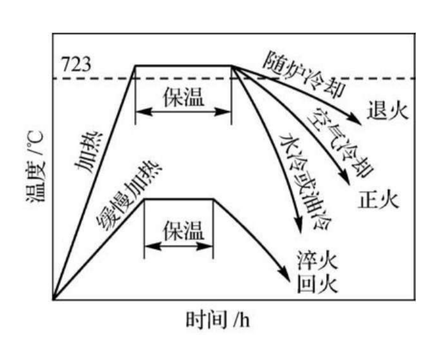


图 1-2　钢的各种热处理工艺规范

热处理工艺按其工序位置可分为预备热处理和最终热处理。预备热处理可以改善材料的加工工艺性能，为后续工序做好组织和性能的准备。最终热处理可以提高金属材料的使用性能，充分发挥其性能潜力。因此，热处理得到了广泛的应用。根据热处理的要求和工艺方法的不同，热处理可以按以下方法分类：

- 热处理
  - 整体热处理：退火、正火、淬火、回火、调质等
  - 表面热处理
    - 表面淬火：感应加热淬火、火焰加热淬火
    - 化学热处理：渗碳、渗氮等
  - 其他热处理：形变热处理、超细化热处理、真空热处理等

由于钢是使用热处理最典型的材料，同时使用范围也最广，故下面介绍几种常用的钢的热处理工艺方法。

1. 退火与正火

（1）退火退火是将金属或合金加热到适当的温度，保持一定的时间，然后缓慢冷却的热处理工艺。

退火的目的：①降低硬度，改善切削加工性；②消除残余应力，稳定尺寸，减少变形与裂纹倾向；③细化晶粒，调整组织，消除组织缺陷。

在生产过程中，退火工艺应用很广泛。根据工件要求退火的目的不同，退火的工艺规范有多种，常用的有完全退火、球化退火和去应力退火等。

（2）正火正火是将钢加热到 Ac_3（亚共析钢）或 A_{cm}（共析、过共析钢）以上 30℃~50℃，保温一定时间后，在静止的空气中冷却的热处理工艺方法。

正火的目的：①对于力学性能要求不高的碳钢、低合金钢结构件，可作最终热处理。②对于低碳钢可用来调整硬度，避免切削加工中的“粘刀”现象，改善切削加工

性。③对于共析、过共析钢，正火可以消除网状二次渗碳体，为球化退火做准备。

正火的冷却速度比退火快，得到的组织较细，工件的强度和硬度比退火高。对于高碳钢的工件，正火后硬度偏高，切削加工性能变差，故宜采用退火工艺。从经济方面考虑，正火比退火的生产周期短，设备利用效率高，生产效率高，节约能源，降低成本以及操作简便，所以在满足工作性能及加工要求的条件下，应尽量以正火代替退火。

退火和正火可以在电阻炉或煤、油、煤气炉中进行，最常用的是电阻炉。电阻炉是利用电流通过电阻丝产生的热量来加热工件，同时用热电偶等电热仪表控制温度，操作简单、温度准确。在加热过程中，由于工件与外界介质在高温下发生化学反应，当加热温度和加热速度控制不当或装炉不合适时，会造成工件氧化、脱碳、过热、过烧及变形等缺陷。因此要严格控制加热温度和加热速度等。图 1－3 为退火和正火的加热温度范围。

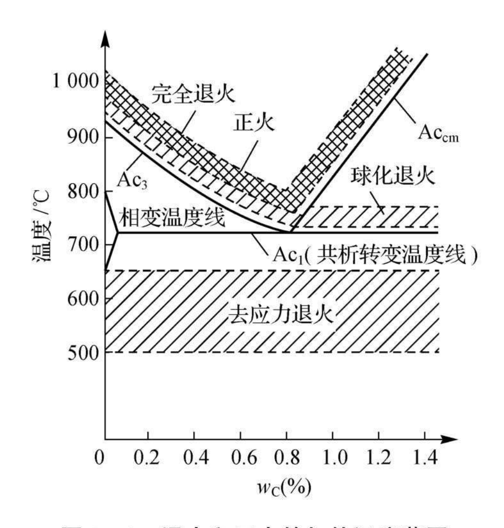


图 1－3　退火和正火的加热温度范围

2. 淬火

淬火是将工件加热到 Ac_1 或 Ac_3 以上某一温度，保温一定时间使其奥氏体化，然后以一定的冷却速度冷却，从而获得马氏体（或贝氏体）的热处理工艺方法（马氏体为 C 在 α-Fe 中的过饱和固溶体）。

淬火的目的是提高钢的强度和硬度，增加耐磨性，并通过回火处理可获得既有较高的强度、硬度，又有一定弹性、韧性的具有优良综合力学性能的工件。

淬火的冷却介质称为淬火剂。常用的淬火剂有水和油两种。水通常用于一般的碳钢零件的淬火。在水中加入食盐或碱，可以提高冷却速度。淬火时也常用植物油或矿物油作淬火剂。油作淬火剂时，冷却能力较水低，可防止工件产生裂纹等缺陷，适用于合金钢淬火。但油易燃，价格较高，且易老化。

淬火操作时，应注意淬火工件浸入淬火剂的方式。如果浸入方式不正确，则可能因工件各部分的冷却速度不一致而造成极大的内应力，使工件发生变形、裂纹或产生局部淬不硬等缺陷。浸入方式的根本原则是保证工件最均匀地冷却，具体操作如图 1－4 所示。

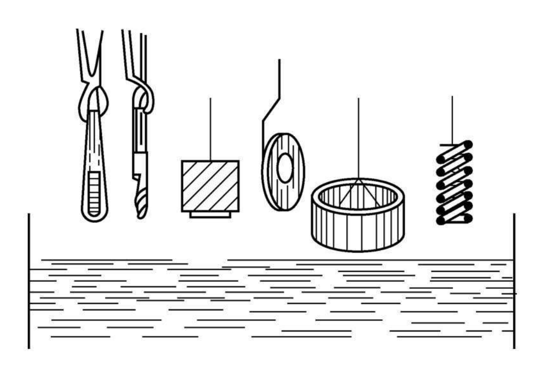


图 1-4　工件浸入淬火剂的正确方法

厚薄不匀的工件，厚的部分应先浸入淬火剂中；细长的工件，如钻头、锉刀、轴等，应垂直地浸入淬火剂中；薄而平的工件，如圆盘铣刀等，不能平着放入而必须立着放入淬火剂中；薄壁环状工件，必须沿其轴线垂直于液面方向浸入；截面不均匀的工件，应斜着浸入淬火剂中，使工件各部分的冷却速度接近。

3. 回火

回火是将淬火后的钢重新加热到 Ac_1 以下的某一温度范围（大大低于退火、正火和淬火时的加热温度），保温后在空气、油或水中冷却的热处理工艺。回火的目的是减小或消除工件在淬火时产生的内应力，降低淬火钢的脆性，使工件获得较好的强度、韧性、塑性、弹性等综合力学性能。

根据回火温度的不同，回火分为低温回火、中温回火和高温回火。

1）低温回火回火温度为 150℃～250℃。低温回火可以部分消除淬火造成的内应力，降低钢的脆性，提高韧性，同时保持较高的硬度。故广泛应用于要求硬度高、耐磨性好的零件，如量具、刃具、冷变形模具及表面淬火件等。

2）中温回火回火温度为 300℃～450℃。中温回火可以消除大部分内应力，硬度有显著的下降，但仍有一定的韧性和弹性。中温回火主要应用于各类弹簧、高强度的轴、轴套及热锻模具等工件。

3）高温回火回火温度为 500℃～650℃。高温回火可以消除内应力，使工件既具有良好的塑性和韧性，又具有较高的强度。淬火后再经高温回火的热处理工艺称为调质处理。对于大部分要求较高综合力学性能的重要零件，都要经过调质处理，如轴、齿轮等。



1.3　常用机械工程材料认知

按化学成分，机械工程材料可以大致分为金属材料和非金属材料，其中金属材料作为使用时间最长、使用范围最广的材料，在整个机械工程材料领域占据主要地位。随着材料科学的飞速发展，非金属材料的性能和质量也不断提高，在现代机械工程领域的应用不断扩大，金属与非金属的相互渗透和发展，形成了现代机械工程材料体系，如图 1-5 所示。

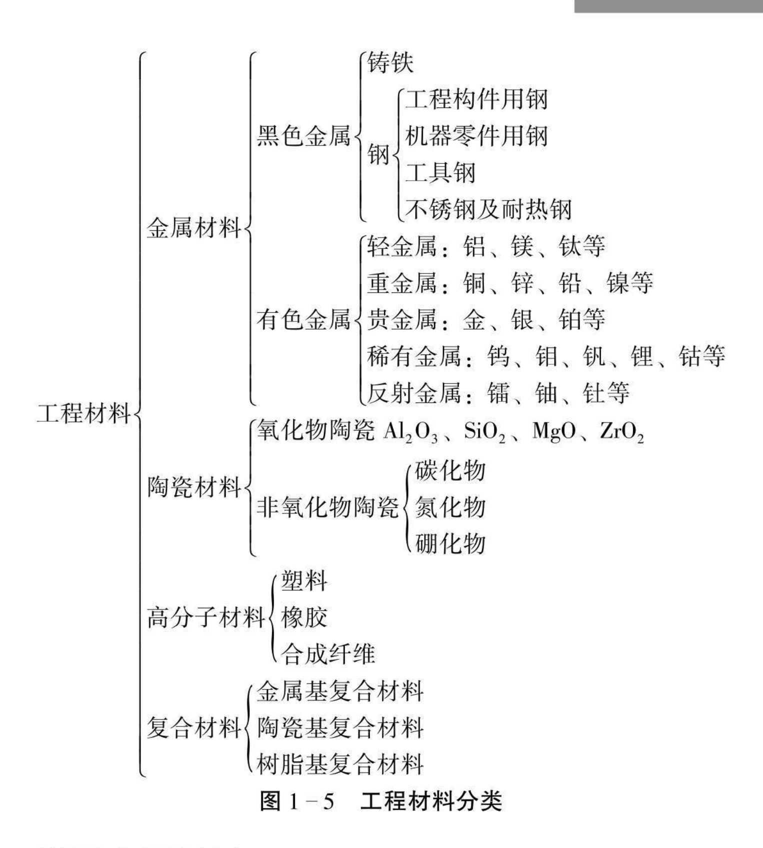


图 1－5　工程材料分类

1.3.1　常用金属材料

工程应用中，通常把铁及其合金（钢、铸铁）称为黑色金属材料，而把非铁金属及其合金称为有色金属材料。

1. 黑色金属材料

(1) 碳素钢

主要由铁和碳组成，且碳含量 $\omega_c<2.11\%$的铁碳合金称为碳素钢。在生产冶炼碳钢的过程中，由于原材料本身的混杂和工艺的需要，不可避免地使碳素钢中含有一定杂质，以锰 Mn、硅 Si、硫 S 和磷 P 为主。在工程应用领域，由于碳素钢的机械性能较好、加工容易、价格低廉，因此被广泛用在生产生活的各个方面。作为一名机械工程技术人员，对碳素钢的分类、编号和用途，都应该有深入了解。常用碳素钢的牌号、性能及用途如表 1－3 所示。

(2) 合金钢

虽然碳素钢具有生产加工方便、加工低廉、机械性能较好等优点，但由于其在受热时强度和硬度较低、耐腐蚀性较差等特点，因此在一些需要高强度、高硬度、高耐磨性及耐热性和耐腐蚀性的场合，碳素钢已不能满足使用要求。

随着材料科学和冶炼技术的进步，通过在钢中加入其他合金元素，如硅、锰、铬、镍、钨、钒、钛等，形成以 Fe 为基的合金，从而改善和提高钢的性能，所获得的产品就是合金钢。

表 1－3　常用碳素钢牌号、性能及用途

<table>
<tr><th>名称</th><th>牌号</th><th>性能及应用</th><th>说明</th></tr>
<tr><td rowspan="6">碳素结构钢</td><td>Q195、Q215A</td><td rowspan="2">塑性较高，有一定强度，通常轧制成薄板、钢筋、钢管、型材等；用作桥梁、钢结构等；机械中用作铆钉、螺钉、地脚螺栓、轴套、开口销、拉杆、冲压零件等</td><td rowspan="6">碳素钢的牌号是由钢材屈服点的字母 Q、屈服点值、质量等级符号（分 A、B、C、D 四个等级）、脱氧方法四个部分组成</td></tr>
<tr><td>Q215B</td></tr>
<tr><td>Q235A、Q235B</td><td rowspan="2">强度较高，可用作转轴、芯轴、拉杆、摇杆、吊钩链、套圈及心部强度要求不高的渗碳或氮化件及焊接件</td></tr>
<tr><td>Q235C、Q235D</td></tr>
<tr><td>Q255A、Q255B</td><td rowspan="2">强度更高，可用作工具、轧辊、主轴摩擦离合器、制动件等</td></tr>
<tr><td>Q275</td></tr>
<tr><td rowspan="4">优质碳素结构钢</td><td>08</td><td>含碳低、塑性好，主要用来制作强度要求不高，需经受大变形的冲压件和焊接件</td><td rowspan="4">牌号用两位数字表示平均 ω_c 的万分之几，如 20 钢即表示其平均 ω_c 为 0.20%。其中 $\omega_c \leqslant 0.25\%$ 的属于低碳钢，其中 ω_c 在 0.25%～0.60%之间的属于中碳钢其中 $\omega_c \geqslant 0.6\%$ 的属于高碳钢</td></tr>
<tr><td>10、15、20、25</td><td>强度低、塑性好，焊接性好。常用作制造各种容器、冲压件和焊接结构件。也常用于制造螺钉、螺母、垫圈以及需要渗碳的零件</td></tr>
<tr><td>35、40、45、50</td><td>含碳量中等，强度、韧性、加工性能好，经调至处理后，可得到具有良好综合力学性能的零件。广泛用来制造齿轮、轴类及套筒等零件</td></tr>
<tr><td>55、60、70</td><td>含碳量较高，淬火后具有较高的弹性，主要用来制造弹簧、轧辊等</td></tr>
<tr><td rowspan="3">碳素工具钢</td><td>T7、T8</td><td>常用于制造要求韧性较高、硬度中等的工具，如冲头、凿子等</td><td rowspan="3">牌号用“碳”或“T”后面加数字表示。数字表示钢中平均 ω_c 的千分之几平均 ω_c 为 0.7%～1.3%属高碳钢</td></tr>
<tr><td>T9、T10、T11</td><td>常用于制造韧性中等、硬度较高的工具，如锯条、钻头、丝锥等</td></tr>
<tr><td>T12、T13</td><td>常用于制造硬度高、耐磨性好而韧性较低的工具，如量具、锉刀、丝锥等</td></tr>
</table>

根据加入的合金元素的不同，合金钢具有不同的性能，常用合金钢的牌号、性能及用途如表 1－4 所示。

表 1－4　常用合金钢牌号、性能及用途

名称	牌号	性能及应用	说明
普通低合金钢	09Mo2、16Mn、14MnNi15MnTi、15MnV	与碳钢相比有较高的强度，较好的塑性、韧性、焊接性和耐蚀性。通常在热轧后经退火或正火使用，用于油槽、桥梁、锅炉、压力容器、建筑结构等	合金钢的牌号采用“数字+化学元素+数字”的方法表示。具体规定如下： 前面的数字表示钢的平均含碳量，结构钢以 ω_c 的万分之几表示，工具钢一般以 ω_c 的千分之几表示（≥1.0 则不标）后面的数字表示合金元素的平均含量，以其质量分数的百分之几表示，小于 1.5%时不标，特殊性能的合金钢与工具钢相似
渗碳钢	20Cr、20MnV、20Mn220CrMoTi、20CrNi4A	含碳量低，可以保证渗碳零件心部较好的韧性和塑性，常用于齿轮、活塞销、轴、蜗杆及大型渗碳齿轮等	
调质钢	40Cr、42CrMo、40MnB40NiMoA、38CtMoAl	经调质处理后使用的钢，大多采用中碳钢，具有良好的综合力学性能，即强度高、塑性和韧性好。广泛用于制造各种重要的机械零件，如齿轮、连杆、轴及螺栓等	
弹簧钢	65Mn、60Si2Mn50CrVA、60Si2CrVA	经热处理后具有较高的屈服比，用于制造各种弹性零件，如各种弹簧和板簧等	
滚动轴承钢	GCr9、GCr15	用于制造滚动轴承的钢珠、套圈	

（3）铸铁

主要由铁和碳组成，且碳含量 ω_c>2.11%的铁碳合金称为铸铁。与碳素钢相比，铸铁的抗拉强度低，塑性和韧性差。但同时，铸铁也具有生产成本低、铸造性能优良、容易进行切削加工、减震性和耐磨性强等优点，因此被广泛应用于现代工业产品中。

铸铁主要由铁和碳两种元素组成，其中根据铸铁中碳的存在形式的不同，可以将铸铁分为不同种类。若碳在铸铁中以化合状态的渗碳体存在，则形成白口铸铁；若以游离状态的石墨存在，则形成灰口铸铁、球墨铸铁、可锻铸铁等。

常用铸铁的牌号、性能及用途如表 1－5 所示。

表 1－5　常用铸铁牌号、性能及用途

名称	牌号	应用	说明
灰铸铁	HT150	用于承受中等负荷的零件，如机座、支架、轴承座、阀体等	牌号以 HTxxx 表示，其中“HT”为灰铸铁代号，后面的三位数字表示 30 试棒的最低抗拉强度值（MPa）
	HT200 HT250	用于承受较大的负荷的零件，如气缸、齿轮、机座、飞轮、床身、气缸体、气缸套、活塞、齿轮箱等	

续表

名称	牌号	应用	说明
可锻铸铁	KTH300-06 KTH330-08	用于承受冲击、振动及扭转负荷的零件，如汽车、拖拉机的后桥壳，转向机构壳体，弹簧钢板支座、低压阀门和各种管接头等	“KT”为可锻铸铁代号，“KTH”“KTZ”分别是黑心和白心可锻铸铁的代号，它们后面的数字分别代表最低抗拉强度值（MPa）和最低延伸率（%）
	KTZ450-06	用于负荷较高和耐磨损零件，如曲轴、连杆、齿轮、凸轮轴等	
球墨铸铁	QT400-18 QT450-10	用于承受冲击、振动的零件，如汽车、拖拉机底盘零件、中低压阀门、管道等	“QT”为球墨铸铁代号，它后面的数字分别代表最低抗拉强度值（MPa）和最低延伸率（%）
	QT500-7 QT800-2	用于负荷大、受力复杂的零件，如曲轴、气缸套、齿轮、凸轮轴、连杆、轧钢机轧辊等	

2. 有色金属材料

与黑色金属相比，有色金属材料由于具有很多黑色金属材料所没有的优良特性，因此被广泛的应用于现代机械工业产品中。例如铝、镁、钛等金属及其合金具有密度小、比强度高的特点，在飞机、汽车和船舶制造等工业中应用十分广泛；又如银、铜、铝等金属及其合金的导电性、导热性能好，是电气、仪表工业不可缺少的材料；再如钨、钼、铌等合金及其金属的熔点高，是制造耐高温零件及电真空原件的理想材料；钛及其合金是理想的耐腐蚀材料。

虽然有色金属使用量少，在机械制造业中，仅占4.5%左右，但由于它们具有钢铁材料所没有的许多特殊性能，因而在现代工业中是不可缺少的材料。在机械工业中应用较多的有铝、铜、钛及其合金和轴承合金等。

（1）铝及其合金

铝的熔点为660.4℃，它在固态下呈面心立方晶体结构，塑性好，可进行冷热压力加工。铝的密度低，为2.72g/cm^3，仅为铁的1/3，属于轻金属。

铝的导电性和导热性能好，广泛用于电气工业及热传导机械中。铝的磁导率低，接近非铁磁材料。铝抗大气腐蚀性能好，是因为在Al的表面生成一层与Al结合很牢固的致密的Al_2O_3薄膜，阻止氧向金属内部扩散和进一步氧化。铝在淡水、食物中也具有很好的耐腐蚀性。但在碱盐的水溶液中，氧化膜易被破坏，因此不能用铝制作盛碱盐溶液的容器。

由于纯铝强度较低，在工业应用时多以铝合金为主。铝合金由于比强度高，用它替代某些钢铁材料，可减轻机械产品的重量，因此，铝合金在机械、电子、化工、仪表、航空航天等部门得到了广泛的应用。常用的铝合金如下。

1）防锈铝合金常用的牌号有5A05（LF5）等。它们的主加元素是镁和锰。锰的主要作用是提高铝合金的抗腐蚀能力，并起固溶强化作用。而镁亦起固溶强化作用，并使合金密度降低。

5A05的密度比纯铝小，强度比Al-Mn合金高，具有高的耐腐蚀性和塑性，焊接性能良好，但切削加工性能差。主要用于焊接容器、管道以及承受中等载荷的零件和制

品，也可用于制作铆钉。

2）硬铝合金这类铝合金又被称为杜拉铝，常用牌号有 2A01（LY1）、2A11（LY11）、2A12（LY12）等。它属于 Al-Cu-Mg 系合金，还有少量的 Mn。Cu 和 Mg 是为了形成强化相 Al_2Cu（θ 相）和 Al_2CuMg（S 相）。Mn 主要是提高合金的抗蚀性，并有一定的固溶强化作用。有时还可加入钛和硼以细化晶粒和提高合金强度。

2A01（LY1）、2A10（LY10）等，属于低强度硬铝，其中 Mg、Cu 含量较低，塑性好，强度低。主要用于制作铆钉，常称为铆钉硬铝。

2A11（LY11）等，属于合金元素含量中等，塑性和强度均属中等，也算标准硬铝。退火后变形加工性能良好，时效后切削性能也好。主要用于轧材、锻材、冲压件以及螺旋桨叶片和大型铆钉等重要零部件。

2A12（LY12）、2A06（LY6）等，合金元素含量较多，强度和硬度较高，塑性及变形加工性能较差，也成为高合金硬铝。主要用于航空模锻件和重要的轴、销等零件。

硬铝合金在使用或加工时应注意两点。

①耐腐蚀性差，易产生晶间腐蚀，特别是在海水中更差。为了提高其耐腐蚀性能，常在硬铝表面包覆一层纯铝，称为包铝，其厚度约为硬铝板厚的 4%～8%。

②固溶处理加热温度范围窄，一般温度波动范围不应超过±5℃，若加热温度过低，则因溶入固溶体的铜量和镁量不足，致使时效后强度和塑性偏低；反之如果过高，则固溶体晶界将发生熔化，产生“过烧”，致使零件报废。所以热处理时必须严格控制加热温度。

3）超硬铝合金常用的牌号有 7A04（LC4）等。这类合金属属于 Al-Zn-Mg-Cu 系合金，并含有少量的铬和锰。Zn、Mg、Cu 和 Al 能形成固溶体和多种复杂的强化相。所以这类铝合金是经固溶处理和时效后获得的强度最高的一种铝合金。铬和锰能提高合金的强度和耐蚀性。

这类合金的缺点，一是受热后易软化，工作温度不能超过 120℃，另一是抗蚀性差，常用包铝法提高其耐蚀性。

超硬铝合金多用于制造受力较大的结构件，如飞机大梁、起落架、飞机的蒙皮等。

（2）铜及其合金

在有色金属中，铜的产量仅次于铝。铜及其合金在我国有着悠久的使用历史，而且范围很广。

纯铜的熔点为 1083℃，密度为 8.93g/cm^3，比钢的密度大约 15%。具有高的导电性、导热性和耐蚀性。具有良好的化学稳定性，在大气、淡水及冷凝水中均有优良的耐蚀性；但在海水中耐蚀性差，易被腐蚀。纯铜在含有 CO_2 的湿空气中其表面将产生碳酸盐［$CuCo_3 \cdot Cu(OH)_2$ 或 $2CuO_3 \cdot Cu(OH)_2$］的绿色薄膜，一般称为铜绿。

纯铜的强度低，不适于作结构材料。工业上结构零件用的是铜合金，主要是利用铜合金化的方法来提高性能。

由于铜合金具有较高的强度，又保持了纯铜的优点，因此在工业中得到了广泛的应用。常用的铜合金主要有黄铜、青铜两类。

1）黄铜　Cu-Zn 合金或以 Zn 为主要加入合金元素的铜合金成为黄铜。黄铜是含锌量在 0%～50%之间的铜-锌合金，它具有较好的机械性能，并易加工成形，对大气和海水有较好的耐腐蚀性，价格低廉，且色泽美丽，是应用最广的铜合金。黄铜在大气和淡水中是稳定的，但在酸和盐类溶液中耐腐蚀性较差。黄铜的腐蚀形式最常见的是“脱锌”和“自裂”两种。脱锌是指黄铜在流动的温水、热水、海水或弱酸性溶液中，

由于 Zn 优先被溶解而被腐蚀，在工件表面上残留一层多孔状（海绵状）的纯铜，由于铜和 α 黄铜形成微电池，进一步加剧了黄铜的腐蚀；自裂是指黄铜经过压力加工，而内部有残余应力时，若在大气中，特别是在有氨气、氨溶液、汞、汞蒸气、汞盐溶液和海水中易产生腐蚀，致使黄铜破裂，这种现象称为自裂。

2）青铜　青铜是人类历史上应用最早的合金，它是 Cu-Sn 合金，由于合金相中有 γ 相，呈青白色而得名青铜。它在铸造时体积收缩量很小，充模能力强，耐腐蚀性好和有极高的耐磨性，而得到广泛的应用。近几十年来由于采用了大量的含 Al、Si、Be、Pb 和 Mn 的铜合金，习惯上也叫青铜。为了区别起见，把 Cu-Sn 合金成为锡青铜，而其他铜合金分别称为铝青铜、硅青铜、铅青铜、铍青铜和锰青铜等。

（3）钛及其合金

钛及其合金，具有质量小、强度高等特点，σ_b 最高可达 1400MPa，和某些高强度合金钢相近，具有良好的低温性能，在-253℃（液氢温度）下强度高，还有良好的塑性和韧性，且有优良的耐腐蚀性能、耐高温性能等优点。由于钛合金的这些优良特点，所以获得广泛的应用。但钛及其合金的加工条件比较复杂，而且对加工环境要求严格，成本高，这在很大程度上限制了其应用。

钛是灰白色轻金属，密度小（4.507g/cm^3），相当于铜的 50%，熔点高（1668℃）。热膨胀系数小，使它在高温工作条件下或热加工过程中产生的热应力小。导热性差，加工钛的摩擦系数大（μ=0.2），使切削、磨削加工困难。塑性好，强度低，易于加工成形，可制成板材、管材、棒材和线材等。钛在大气中十分稳定，表面生成致密氧化膜，使它具有耐腐蚀作用，并有光泽。同时在海水和氯化物中具有优良的耐蚀性，在硫酸、盐酸、硝酸、氢氧化钠等介质中都有良好的稳定性。但不能抵抗氢氟酸的侵蚀作用。钛的抗氧化能力优于大多数不锈钢。

工业纯钛一般制作 350℃以下工作的、强度要求不高的零件。如石油化工用热交换器、反应器、海水淡化装置和舰船零部件。

常用的工业纯钛及钛合金的牌号、性能及用途如表 1-6 所示。

表 1-6　常用工业纯钛及钛合金牌号、性能及用途

牌号	性能	应用
TA1、TA2、TA3	塑性和韧性较好、耐腐蚀性能好、但强度较差、耐高温性差，适用于要求高塑性的冲压件和耐腐蚀件	常用于制造飞机骨架、蒙皮、船用阀门、管道、海水淡化装置，或用于制造化学工业中的泵、冷却器、搅拌器蒸馏塔等
TC1、TC2、TC3、TC4	强度和塑性都较好、耐腐蚀性好，但耐高温性较差，适用于各类对强度要求较高的结构件	常用于工作温度在 400℃以下的零件、结构锻件、各种容器、舰船耐压壳体等
TC6	强度和塑性都较好、耐腐蚀性好，耐高温性较好，适用于对工作温度要求较高的结构件	常用于工作温度 450℃以上的零件，如飞机发动机结构件等

1.3.2　常用非金属材料

1. 工程塑料

工程塑料是应用最广的有机高分子材料，也是最重要的工程结构材料。其主要成分是合成树脂，此外还包括填料或增强材料、增塑剂、固化剂等添加剂。它具有很多优良性能，如密度小、耐腐蚀、耐磨和减磨性好、良好的电绝缘性和成型性等，其不足之处是强度、硬度较低，耐热性差，易老化和蠕变等。现已有几百种工程塑料在工业生产中被广泛应用。以下介绍几种较典型的工程塑料，如表 1-7 所示。

表 1-7　几种典型的工程塑料性能及应用

名称	性能	应用
聚氯乙烯（PVC）	分为硬质和软质两种。硬质聚氯乙烯强度、硬度较高，耐蚀、耐水性好，易于热成形、热接和切削加工；软质聚氯乙烯强度、硬度低，耐蚀性差，易老化	常用于制造塑料管、塑料板、薄膜、软管、低压电线的绝缘层等。加入发泡剂可制成泡沫塑料，用于垫衬、包装袋等
ABS 塑料	是丙烯腈（A）、丁二烯（B）、苯乙烯（S）的三元共聚物，具有三种组元的特性。丙烯腈使 ABS 具有良好的耐热、耐蚀性和一定的表面硬度；丁二烯能提高 ABS 的弹性和韧性；苯乙烯使 ABS 有较高的刚性、良好的加工工艺性和着色性。所以 ABS 具有较高的综合性能	ABS 的用途极广，在机械工业中可制造轴承、齿轮、叶片、叶轮、设备外壳、管道、容器、把手等，以及电气工业中仪器、仪表的各种零件。近年来在交通运输车辆、飞机零件上的应用发展很快，如车身、方向盘、内饰材料等
聚酰胺（PA）（尼龙）	又称为尼龙或锦纶，具有较高的强度和韧性，较好的耐磨性、自润滑性以及良好的成形工艺性。此外，其耐蚀性也较好，并且抗霉、抗菌、无毒。但尼龙具有较大的吸水性，尺寸稳定性差，耐热性不高，蠕变值较大	被广泛用作各种机器零件，如轴承、齿轮、轴套、螺母、垫圈等
聚四氟乙烯（F-4）	在很宽的温度范围内性能相当稳定，可长期在 -180～240℃之间使用，耐热性和耐寒性极好，还具有极高的耐蚀性和极低的摩擦因数，吸水性极小，绝缘鞋优良，素有“塑料王”之称。缺点是其强度较低，冷流性大，结晶熔点高，加工成形困难	广泛用于化工管道、泵、阀门和各种机械密封垫圈、无润滑活塞环等
酚醛塑料（PF）	有热塑性和热固性两类。具有较高的硬度、刚度和一定的强度、耐热性、绝缘性及优良的耐磨性等	用于电源开关、插座、灯头等绝缘件以及齿轮、轴承、汽车制动片等机械零件

2. 合成橡胶

合成橡胶是通过化学合成的方法，即以生胶为基础加入适量的配合剂而制成的高分子材料。配合剂包含有硫化剂、填充剂、软化剂及发泡剂等。常用合成橡胶的性能和应用如表 1-8 所示。

表 1－8 常用合成橡胶性能及应用

种类		性能	应用
通用橡胶	丁苯橡胶（SBR）	比天然橡胶质地均匀，耐热、耐老化性能好，但加工成形困难，硫化速度慢	广泛用于制造车胎、胶布、胶版等
	顺丁橡胶（BR）	有较高的耐磨性，比丁苯橡胶高 26%	用于制造轮胎、V 型胶带、减震器、电绝缘制品等
特种橡胶	丁腈橡胶（NBR）	有良好的耐油性和耐蚀性，较好的耐热、耐磨、耐老化性等，其耐寒性和电绝缘性较差，加工性能也不好	主要用于制造各种耐高、低温的橡胶制品，如管道接头，高温设备的衬垫、衬圈，电绝缘层等
	硅橡胶	具有优良的耐热、耐寒、耐臭氧性，有良好的绝缘性	用于制造耐油制品，如输油管、密封圈、油箱等

3. 复合材料

复合材料是指由两种或两种以上物理、化学性质不同的物质，经人工合成的一种多相固体材料。一般由高强度、高模量、脆性大的增强材料和低强度、低模量、韧性好的基体材料所组成。它不仅具有各组成材料的优点，而且还可以获得单一材料不具备的优良综合性能。具有高的比强度和比模量，较好的疲劳强度和耐蚀、耐热、耐磨性，同时还有一定的减震性。已成为一种大有发展和应用前途的新型工程材料。常用复合材料性能及用途如表 1－9 所示。

表 1－9 常用复合材料性能及用途

名称	性能	应用
纤维增强复合材料	常以树脂、橡胶、塑料、陶瓷等非金属材料或金属材料为基体，以玻璃纤维、碳纤维、石墨纤维等有机纤维或金属及陶瓷晶须等高强度、高模量的纤维为增强材料组合而成	热固性玻璃钢：轴承、齿轮、仪表盘、壳体、叶片等 热塑性玻璃钢：车身、船体、直升机旋翼等 碳纤维树脂复合材料：比强度和比模量高的飞行器结构件、重型机械的轴瓦、齿轮及化工设备的耐腐蚀件等
层合复合材料	由两层或两层以上不同性质的材料叠合而成，以达到增强的目的	三层合复合材料：无油润滑轴承、机床导轨、衬套、垫片等 夹层合复合材料：飞机、船舶的隔板及冷却塔等
颗粒复合材料	以高强度、高硬度的细小陶瓷或金属颗粒，均匀分散在韧性基体中而形成的	颗粒与树脂复合材料：塑料中加颗粒状填料，橡胶加炭黑增强 陶瓷粒与金属复合：（金属陶瓷）如 WC 硬质合金刀具

4. 工业陶瓷

陶瓷是一种无机非金属固体材料。其特点是高硬度、高耐磨性、高弹性模量、高

抗压强度、高熔点、高化学稳定性、耐高温、耐腐蚀，但抗拉强度低，脆性大。此外，大多数陶瓷可作绝缘材料，有的可作半导体材料、压电材料、热电和磁性材料，故其在工业上的应用日益广泛。根据成分和用途，工业陶瓷可分为硅酸盐陶瓷（或普通陶瓷）和特种陶瓷两种。其性能和用途如表 1－10 所示。

表 1－10　常用陶瓷性能及用途

名称	性能	应用
硅酸盐陶瓷	质地坚硬、耐酸、耐高温、不生锈，良好的绝缘性能。由于成分中含有较多的碱金属氧化物和其他物质，故脆性大，强度不高	广泛用于日用、电气、化工、建筑等方面，如装饰瓷器、绝缘材料、餐具、耐蚀容器、管道、设备等
特种陶瓷	特种陶瓷按化学成分可分为氧化物陶瓷、氮化物陶瓷、硅化物陶瓷、氟化物陶瓷等。其性能优于硅酸盐陶瓷，如硬度、强度高，耐磨、耐高温；有极高的化学稳定性和耐腐蚀性	各种泵类机械的密封件，轴承垫圈，刀具，汽车发动机、柴油机内耐热、耐磨零件，化工管道、泵、阀等

思考题

1. 简述什么是金属晶格？纯金属晶体有哪些晶格类型？
2. 金属材料热处理的作用是什么？常用的热处理方法有哪些？它们之间有什么区别？
3. 简述什么是黑色金属，常用的黑色金属有哪些？
4. 简述什么是有色金属，常用的有色金属有哪些？
5. 常用的非金属材料有哪些？各自的性能特点是什么？



第2章　切削加工基础

教学目的和要求：随着现代加工技术的不断发展，切削加工的手段不断增多，通过对切削加工基础知识的学习，可以了解切削加工机床，熟悉切削加工过程，掌握切削加工工艺。本章的要求为熟悉切削加工操作过程中的切削运动及切削用量三要素，熟悉刀具材料以及刀具角度，掌握各类常用加工机床的加工范围，了解常用零件的切削加工步骤。



2.1　切削加工概述

所谓切削加工是指用比工件硬度更高的切削工具（包括刀具、磨具和磨料）把坯料或工件上多余的材料层切去成为切屑，使工件获得规定的几何形状、尺寸和表面质量等达到预期技术要求的加工过程。机械加工时工件和刀具分别夹持在机床的相应装置上，依靠机床提供的动力和其内部传动关系，由刀具对工件进行切削加工。其主要加工方式有车削、铣削、刨削、磨削、镗削等，使用的机床分别称为车床、铣床、刨床、磨床、镗床等。钳工则是由人工利用各类工具（锉刀、锯条等）对零件进行加工的过程。

随着现代加工技术的不断发展和自动化程度的不断提高，切削加工的手段不断增多，其特种加工技术（利用各种能量，如电能、激光、等离子、超声波等）也不断推陈出新，使得加工的手段和工艺更加广泛，传统机械加工的许多内容被取代。但传统机械加工也具有它独有的优势（如成本低、操作方便、异形零件的单件加工、模具特殊型腔的打磨、产品的装配与修理等）仍将长期存在，尤其是一些掌握特殊技能的操作工人，其加工单件产品的质量和配合部位的精度会比现代加工技术更高，因此，传统机械加工仍然具有强大的生命力，在切削加工仍占重要的位置。



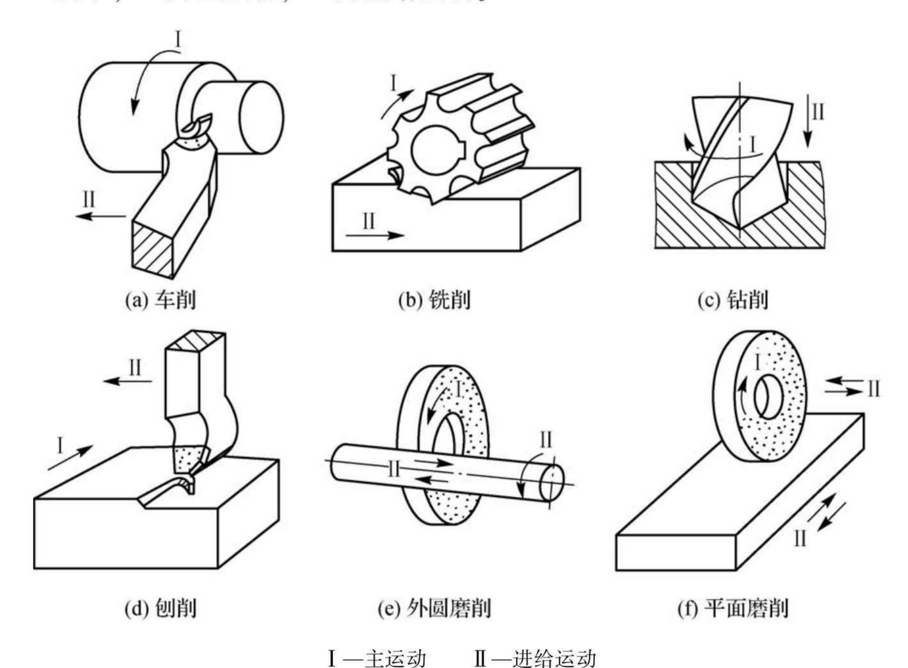
2.2　切削加工的基本术语及定义

2.2.1　切削运动

1. 切削运动

机器零件大部分由一些简单几何表面组成，如各种平面、回转面、沟槽等。机床

对这些表面切削加工时，刀具与工件之间需有特定的相对运动，这种相对运动称为切削运动。根据在切削过程中所起的作用不同，切削运动可分为主运动和进给运动两种，如图 2－1 所示，Ⅰ为主运动，Ⅱ为进给运动。



Ⅰ—主运动　　Ⅱ—进给运动

图 2－1　常见机械加工时的切削运动

（1）主运动

主运动是使工件与刀具产生相对运动以进行切削的最基本运动。如果没有主运动，就无法对工件进行切削加工。在切削运动中主运动的速度最高、消耗的功率最大，并且主运动只有一个。例如，车削中工件的旋转运动，铣削中铣刀的旋转运动，钻削中钻头的旋转运动，刨削中牛头刨床上刨刀的往复直线移动，磨削中砂轮的旋转运动等都是主运动。

（2）进给运动

进给运动是使主运动能够继续切除工件上多余的金属，以便形成工件表面所需的运动。如果没有进给运动，就不可能加工完成完整零件的形面，在切削运动中进给运动的速度相对较低、消耗的功率相对较少，进给运动可以有一个或几个。如车削时车刀的纵向或横向运动，铣削过程中的工件移动，钻削中的钻头的轴线移动，磨削中工件的移动或转动。

2. 切削过程中形成的三个表面

在切削过程中，工件上同时形成三个不同的变化着的表面，如图 2－2 所示。

（1）待加工表面

工件上即将被切除的表面称待加工表面，在切削过程中它的面积不断减少，直至全部切除。

（2）已加工表面

工件上经刀具切削后形成的新表面称为已加工表面。在切削过程中它的面积逐渐扩大。

（3）过渡表面（加工表面）

在工件需加工的表面上，被切削刃切削形成的轨迹表面称为过渡表面。它在主运动的下一行程被切掉或由下一切削刃切掉（多齿刀具）。

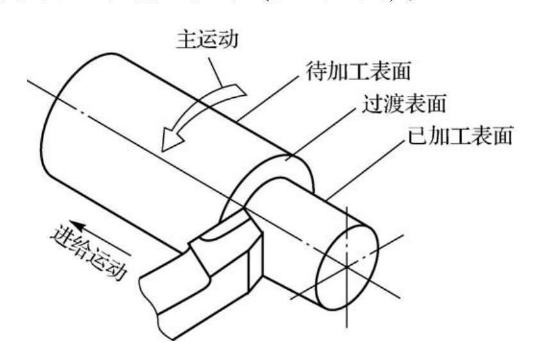


图 2-2　切削过程中形成的表面

2.2.2　切削要素

在切削加工过程中，切削的要素主要包括切削用量和切削层几何参数。

1. 切削用量三要素

切削用量是指切切削速度 v_c、进给量 f（进给速度 v_f）和切削深度（背吃刀量）a_p 三者的总称，也称为切削三要素。切削三要素的合理选择是保证切削加工顺利进行的首要条件，在实际生产过程由于加工零件的材料、热处理状态、加工性质、工艺状态和生产调度等多方面的因素变化，切削要素具有较大的不确定性，特别是不断涌现的新材料和新工艺。因此，作为一个合格的工艺人员或操作人员，如何适应上述变化，在制订工艺过程或加工过程选择较合理的切削要素，将是一个不断学习的过程。

如今，国内外的众多刀具生产厂家和研究机构对各种工艺环节下切削用量的合理选择做了大量的工作，工程技术人员可通过查阅各类资料获取相关信息，但对于一些特殊材料和新材料新工艺的切削用量仍然作为保密资料不会被相关国家或研究机构公开，因此，这还需要我们做出相当大的努力来完成此项工作，以使其发挥更大的经济效益。

（1）切削速度 v_c

切削刃上选定点相对于工件待加工表面在主运动方向上的瞬时速度。它是描述主运动的参数，法定单位为 m/s，但在生产中除磨削的切削速度单位用 m/s 外，其他切削速度单位习惯上用 m/min。

当主运动为旋转运动时（如车削、铣削、磨削等），切削速度勘的计算公式为

$$v_c = \frac{\pi d_w n}{60 \times 1000}(\mathrm{m/s}) \text{ 或 } v_c = \frac{\pi d_w n}{1000}(\mathrm{m/min}) \tag{2-1}$$

当主运动为往复直线运动时（如刨削、插削等），切削速度的计算公式为：

$$v_c = \frac{2Ln_r}{60 \times 1000}(\mathrm{m/s}) \text{ 或 } v_c = \frac{2Ln_r}{1000}(\mathrm{m/min}) \tag{2-2}$$

式中：d_w—为待加工表面的直径或刀具切削处的最大直径（mm）；

n—为工件或刀具的转速（r/min）；

L—为往复运动行程长度（mm）；

n_r—为主运动每分钟往复的次数（行程次数）（str/min）。

切削速度对加工质量的影响较大。在粗加工阶段，其切削加工的主要矛盾是用最短的时间将工件多余的毛坯去除，因此为保证刀具的耐用度和切削力对工艺系统的影响，往往取值较低；在精加工阶段，其切削加工的主要矛盾是保证加工质量（这里主要体现为表面粗糙度），因此，往往取较高值。

对于普通机床而言，主轴的转速在一个工步过程是保持不变的，因此为保证加工质量，其切削速度公式中的 d_w 往往取大值。但对于加工零件直径是连续变化的工件（如车床加工锥度、成形面、端面等），在确定切削速度后（即线速度恒定），随着直径的连续变化其主轴的转速也应随之变化，但普通机床不能达到此项功能。而对于数控机床（如配备伺服电机）则就具有恒线速功能，即在加工过程，在线速度恒定的情况下，主轴转速的变化是与工件直径呈反比的关系，即（$n=\frac{1000v_c}{\pi d}$），就其这一点功能上就比普通机床更胜一筹。

（2）进给量

表示进给运动速度大小的方法有三种：进给速度 v_f、进给量 f、每齿进给量 f_z。

进给速度 v_f：是指切削刃上选定点相对于工件的瞬时进给运动速度，单位为 mm/s

进给量 f：是指主运动在一个工作循环内，刀具与零件在进给方向上的相对位移量。进给量常用单位有：当主运动为旋转运动（如车床）时，用每转进给量 mm/r 表示；当主运动为往复直线运动（如刨床）时，用每行程进给量 mm/str 表示；

每齿进给量 f_z：对于多齿刀具（如铣刀），每转一齿，工件和刀具在进给运动方向上的相对位移量，单位为 mm/z。

（3）切削深度（背吃刀量）a_p

一般是指工件待加工表面与已加工表面间的垂直距离，单位为 mm。

铣削的切削深度（背吃刀量）为沿铣刀轴线方向上测量的切削层尺寸。

车削外圆时切削深度（背吃刀量）计算公式为：

$$a_p=(D-d)/2(\text{mm}) \tag{2-3}$$

式中：D—为工件上待加工表面的直径（mm）。

d—为工件上已加工表面的直径（mm）。

对于钻削时切削深度（背吃刀量）计算公式为

$$a_p=d/2(\text{mm}) \tag{2-4}$$

式中：d—为钻孔直径（mm）。

切削深度（背吃刀量）增加，生产效率提高，但切削力也随之增加，故容易引起工件振动，使加工质量下降。

（4）切削三要素选择原则

粗加工阶段的主要矛盾是尽快地将零件多余的毛坯去除，因此，在工艺系统刚性允许的情况下，首选较大的背吃刀量，其次选择较大的进给量，最后选择较小的切削速度。精加工阶段的主要矛盾是保证加工质量，因此，在主轴转速和刀具允许的情况下，首选较高的切削速度，其次选择较低的进给量，最后选择较小的背吃刀量。

2. 切削层几何参数

切削层是指工件上相邻两个加工表面之间的一层金属（图2－3），即工件上正被切削刃切削着的那层金属。

a_w 为切削宽度，即沿主切削刃方向度量的切削层尺寸。

a_c 为切削厚度，即相邻两加工表面间的垂直距离。

A_c 为切削面积，即切削层垂直于切削速度截面内的而积。

$$A_c = a_w a_c = a_p f \tag{2-5}$$

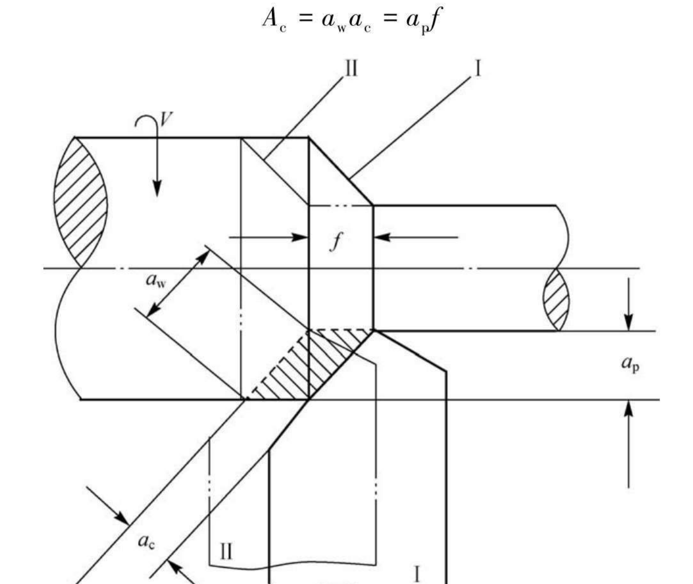


图2－3　切削层几何参数



2.3　刀具材料及其几何角度

刀具是切削加工中对生产率、加工质量和成本影响最活跃的因素。在金属加工过程中，刀具直接参与切削，为使刀具具有良好的切削性能，必须选择合适的刀具材料、合理的刀具角度和适当的刀具结构。

2.3.1　刀具材料

1. 刀具材料应具备的性能

通常讲的刀具材料是指切削部分的材料。在切削加工过程中，刀具切削部分在高温下承受着很大的切削力与剧烈的摩擦。在断续切削时，还伴随着冲击和振动，引起切削温度的波动，因此刀具材料应具备以下性能。

（1）高硬度和高耐磨性　刀具材料的硬度必须大大高于工件材料的硬度。一般刀具材料在室温下应具有60 HRC以上的硬度。耐磨性是指刀具材料抵抗磨损的能力。一般刀具材料硬度越高，耐磨性就越好。

（2）足够的强度和韧性　刀具材料要承受很大的切削力，断续切削时还要承受冲击载荷，所以刀具材料必须具备足够的强度和韧性。一般来说，刀具材料的硬度越高，强度就越低，材料就越脆。

（3）高的耐热性　耐热性是指刀具材料在高温下保持其硬度、耐磨性、强度和韧性的能力。它是衡量刀具材料性能的主要指标，耐热性越高，刀具允许的切削速度就越高。

除此之外，为便于刀具的制造和刃磨，要求刀具具有良好的工艺性；为了降低成本，提高效益，还应考虑刀具材料的经济性。

2. 常用刀具材料

常用的刀具材料有碳素工具钢、合金工具钢、高速钢、硬质合金和超硬材料（如陶瓷、人造金刚石、立方氮化硼等）。目前应用最多的刀具材料是高速钢和硬质合金。

（1）碳素工具钢

该材料属于优质高碳钢，淬火后硬度大于 62HRC，但淬火后易产生变形和开裂，由于其红硬温度仅为 200℃～300℃，所以常用于制造手工工具和切削速度较低的钳工刀具，如锉刀、手工锯条、刮刀等。

（2）合金工具钢

在碳素工具钢中加入了少量的硅、锰、铬、钨等合金元素，使其硬度和耐磨性均有所提高，其红硬温度可达 300℃～400℃，淬火变形较小，因此，常用于制造形状复杂的刀具，如铰刀、丝锥、板牙等。

（3）高速钢

在合金工具钢中加入了钨、铬、钒等合金元素，使其硬度达 62～65HRC、红硬温度达 500～600℃，且具有较高的强度和韧性，因此，常用于制造各类形状复杂的刀具，如钻头、铣刀、拉刀、丝锥、板牙、齿轮刀具等，应用相当广泛。

（4）硬质合金

硬质合金是由难熔金属碳化物（WC、TiC）和金属黏结剂（如 Co）经粉末冶金方法制成的。可分为碳化钨基和碳（氮）化钛基两大类。我国常用的碳化钨基硬质合金有钨钴类（如 YG3、YG6、YG8）和钨钛钴类（如 YT30、YT15、YT5 等），随着技术的不断进步，新牌号的硬质合金也非常多，且已在切削加工中广泛使用。

硬质合金根据所含合金元素的比例其性能也各有不同，但一般情况下硬质合金的硬度可达 78HRC 左右，耐热温度可达 1000℃以上，其耐磨性也比高速钢好。正是因为硬质合金具有上述优点，其抗弯强度、冲击韧性和工艺性能较差，因此，只能制造形状相对于高速钢更简单的刀具，如各种形状的刀片、整体硬质合金的铣刀、铰刀、钻头等。

随着涂层技术（在韧性较好的硬质合金或高速钢刀具的基体上，通过化学气相沉积法（CVD）或物理气相沉积法（PVD）涂上一薄层耐磨性较高的难熔化合物，如 TiC 或 TiN，在提高刀具耐磨性的情况下而不降低其韧性，同时提高了刀具的抗氧化和抗黏结的性能，提高了刀具的寿命）的不断发展，现在也大量使用该类刀具。

硬质合金刀具（片）的成本比高速钢高，但若能合理使用，其性价比也是比较高的。

2.3.2 刀具的几何角度

切削刀具的种类很多，但它们的结构要素和几何角度有许多共同的特征。各种切削刀具中，车刀最为典型。在图 2－4 所示刀具中的任何一齿都可以看成是车刀切削部分的演变及组合，因此从车刀入手进行切削角度的研究就更具有实际意义。

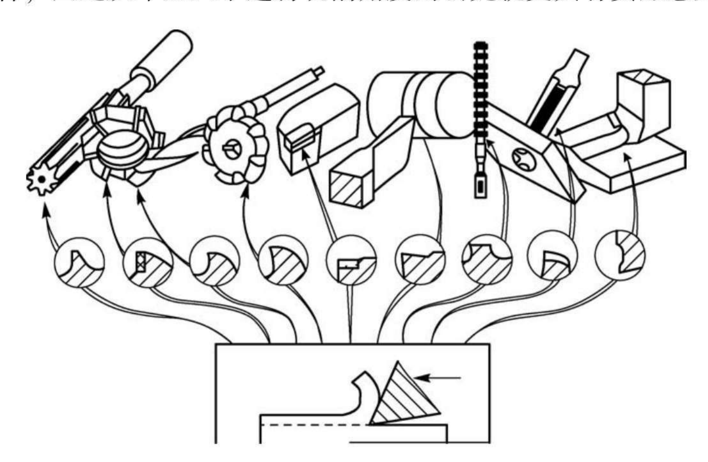


图 2－4 常见刀具切削部分形状

1. 车刀结构

车刀是由刀头和刀杆两部分组成。刀头是车刀的切削部分，刀杆是车刀的夹持部分。切削部分由三面、二刃、一尖组成，如图 2－5 所示。

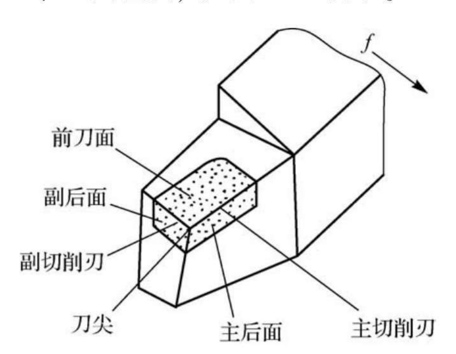


图 2－5 车刀切削部分组成

（1）前刀面 A_γ：刀具上切屑流过的表面。

（2）主后面 A_α：刀具上与过渡表面（加工表面）相对的表面，与前面相交形成主切削刃。

（3）副后面 A_α'：刀具上与已加工表面相对的表面，与前面相交形成副切削刃。

（4）主切削刃 S：前面与主后面相交形成的刀刃，担负主要的切削工作。

（5）副切削刃 S'：前面与副后面相交形成的刀刃，担负少量的切削工作。

（6）刀尖：主、副切削刃的过渡部分。为强化刀尖，常将其磨成小圆弧形。

2. 确定刀具几何角度的参考系

刀具角度是确定刀具各刀面和各刀刃在空间方位的几何参数，要确定刀具角度的

大小，必须有空间坐标参考系为基准。常用的刀具标注角度参考系有主剖面（正交平面）参考系，它由三个相互垂直的平面，即基面、切削平面和主剖面组成，如图 2－6 所示。

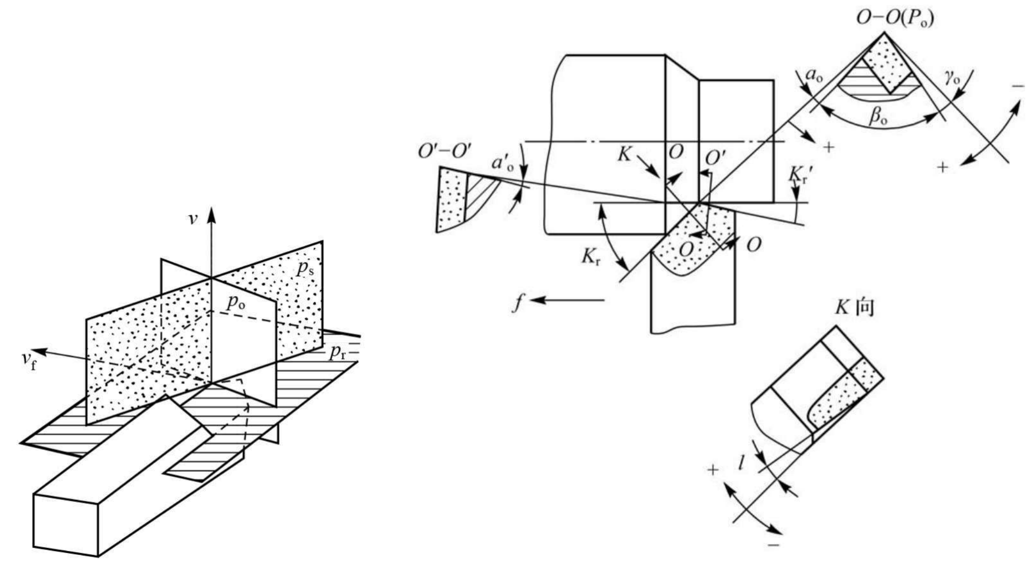


图 2－6　车刀主剖面参考系　　　　图 2－7　车刀主要角度

1）基面（P_r）：过切削刃选定点，并与刀具上的安装面（轴线）平行或垂直的平面。一般来说基面垂直于假定的主运动方向。

2）切削平面（P_s）：过切削刃选定点，与切削刃相切，并垂直于基面的平面。

3）主剖面（P_o）：过切削刃选定点，并同时垂直于基面和切削平面的平面。

3. 刀具的几何角度及其作用

在主剖面参考系中，车刀的主要角度有前角、后角、主偏角、副偏角和刃倾角，如图 2－7 所示。

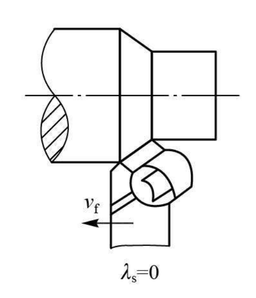
（1）前角 γ_0：在主剖面内测量的前面与基面之间的夹角。前角可以为正、负和零，当前面低于基面时，前角为正；反之为负。前角增大会使主切削刃锋利，切屑变形小，切削省力，切削温度低。但前角过大，会使刀具的刚性和强度变差，散热能力变差，容易造成磨损和崩刃。

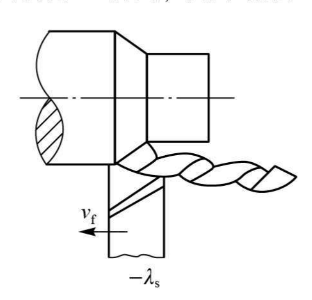
（2）后角 α_0：在主剖面内测量的主后面与切削平面之间的夹角。后角可以为正、负和零。后角主要影响刀具主后面与工件过渡表面之间的摩擦，适当增大后角，可以提高刀具的耐用度和加工质量。

（3）主偏角 k_r：在基面内测量的切削平面与进给运动方向之间的夹角。减小主偏角，可提高刀具的耐用度，减小残留面积高度最大值，增大切削厚度，使切屑容易折断。但减小主偏角也会使径向力 F_y 增大，在工艺系统刚性不足时，影响工件表面粗糙度，降低刀具耐用度。

（2）副偏角 k_r'：在基面内测量的切削平面与进给运动反方向之间的夹角。副偏角主要影响已加工表面粗糙度和刀具的耐用度。

（3）刃倾角 λ_s：在切削平面内测量的主切削刃与基面之间的夹角。其作用主要是控制切屑的流动方向。如图 2－8 所示，当刀尖处于切削刃的最低点时 λ_s 为负值，刀尖强度好，切屑流向已加工表面，用于粗加工；当刀尖处于切削刃的最高点时 λ_s 为正值，刀尖强度被削弱，切屑流向待加工表面，用于精加工。





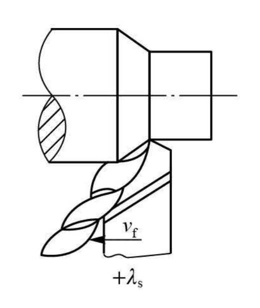


图 2－8　刃倾角对切屑流向的影响



2.4　常用切削加工机床

切削加工机床是利用切削及特种加工方法将毛坯加工成机器零件的设备。金属切削机床是机械制造装备的重要组成部分，是制造机器的机器，因此又称为“工作母机”，习惯上简称机床。机床的质量在很大程度上反映了一个国家制造业的水平。

2.4.1　机床的分类

机床的种类繁多，为了便于区别、使用和管理，必须加以分类。对常用机床的分类方法有以下几种：

机床最基本的分类方法是按照加工性质、所用刀具和用途进行分类，可分为车床、铣床、刨插床、钻床、磨床、镗床、齿轮加工机床、螺纹加工机床、拉床、特种加工机床、锯床及其他机床共 12 大类。其中在每一类机床中，又按照工艺范围、布局形式和结构性能的不同分为若干组，每一组又分为若干系。

同类机床按应用范围不同可分为通用机床（又称万能机床）、专门化机床、专用机床。通用机床可用于多种零件不同工序的加工，加工范围较广、通用性较大，但结构比较复杂、生产率较低，主要适用于单件小批生产。如卧式车床、万能外圆磨床、万能升降台铣床等。专门化机床用于加工一定尺寸范围内的某一类或几类零件的某些特定工序，适用于成批生产。如曲轴车床、花键铣床。专用机床只能用于加工某一特定零件的某一道特定工序。它是根据工艺要求专门设计制造，其生产率较高，机床自动化程度也较高，通常用于大批量生产。如车床主轴箱的专用镗床、车床专用导轨磨床及组合机床等。

同种机床按工作精度不同可分为普通精度机床、精密机床和高精度机床。

按机床的自动化程度可分为手动、机动、半自动和自动机床。

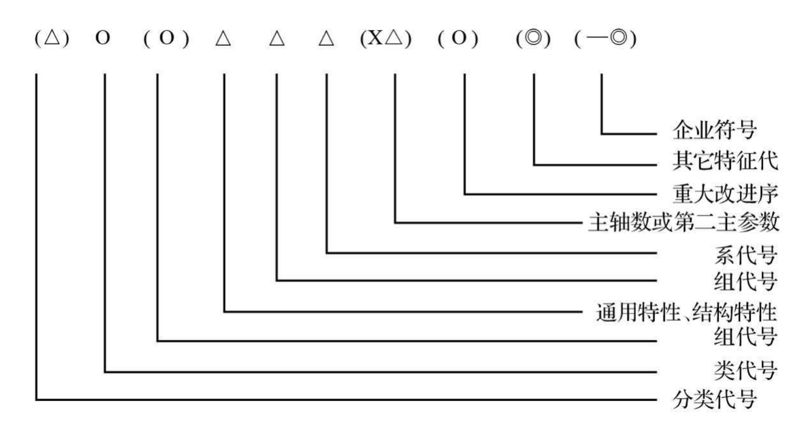
按机床的重量和尺寸可分为仪表机床、中型机床（一般机床）、大型机床（质量大于 10 t）、重型机床（质量大于 30 t）和超重型机床（质量大于 100 t）。

按机床主要工作部件的数目可分为单轴、多轴或单刀、多刀机床等。

2.4.2　机床的型号编制

机床的型号是每种机床产品的代号。我国的机床型号是根据 GB/T 15375－2008《金属切削机床型号编制方法》规定，由汉语拼音字母和阿拉伯数字按一定规律组合而成。机床的型号用以简明地表示机床的类型、性能、结构特性以及主要规格等。

普通机床型号构成如下：



其中：

①有“（　）”的代号或数字，当无内容时则不表示，若有内容则不带括号；

②有“O”符号者，为大写的汉语拼音字母；

③有“△”符号者，为阿拉伯数字；

④有“◎”符号者，为大写的汉语拼音字母或阿拉伯数字，或两者兼有之。

1. 机床类、组、系的划分及其代号

机床的类代号用大写的汉语拼音字母表示，必要时每类可分为若干分类，分类代号用阿拉伯数字表示（第一分类不予表示），作为型号的首位。机床的类别及代号如表 2－1 所示。

表 2－1　普通机床类别代号

类别	车床	钻床	镗床	磨床			齿轮加工机床	螺纹加工机床	铣床	刨插床	拉床	特种加工机床	锯床	其他机床
代号	C	Z	T	M	2M	3M	Y	S	X	B	L	D	G	Q
读音	车	钻	镗	磨	二磨	三磨	牙	丝	铣	刨	拉	电	割	其

在同一类机床中，主要布局或使用范围基本相同的机床，即为同一组。在同一组机床中，若其主参数、主要结构及布局形式相同的机床，即为同一系。

每类机床分为 10 个组，每组又分为 10 个系。机床的组用一位阿拉伯数字（0~9）表示，位于通用特性代号、结构特性代号之盾；若无通用特性或结构特性代号就位于类代号之后。机床的系，用一位阿拉伯数字（0~9）表示，位于组代号之后。

2. 机床的特性代号

机床的特性代号表示机床具有的特殊性能，分为通用特性和结构特性。用汉语拼音字母表示，位于类代号之后。通用特性代号有统一固定的含义，在各类机床中所表

示的意义相同，如表 2-2 所示。如果某一机床同时具有两种通用特性，则可将两个代号都在机床型号中加以表示。例如，“MBG”表示半自动高精度磨床。结构特性代号用于区分主参数相同而结构、性能不同的机床，排在类代号和通用特性代号之后，无统一含义，但是不能使用通用特性代号已采用的字母和“I”、“O”两个字母。如果某机床只有结构特性代号而无通用特性代号，则只表示结构特性代号，位于类代号之后。例如，CA6140 型普通车床型号中的“A”，可理解为：CA6140 型普通车床在结构上区别于 C6140 型普通车床。

表 2-2　机床通用特性代号

通用特性	高精密	精密	自动	半自动	数控	加工中心（自动换刀）	仿形	轻型	加重型	简式或经济型	柔性加工单元	数显	高速
代号	G	M	Z	B	K	H	F	Q	C	J	R	X	S
读音	高	密	自	半	控	换	仿	轻	重	简	柔	显	速

3. 主参数、设计顺序号和第二主参数

机床主参数代表机床规格的大小，用折算值表示，位于组系代号之后。各类主要机床的主参数名称及折算系数如表 2-3 所示。某些通用机床，当无法用一个主参数表示时，则在型号中用设计顺序号表示，设计顺序号从 1 开始，当设计顺序号小于 10 时，由“01”开始编号。第二主参数一般是指主轴数、最大跨距、最大工件长度、工作台工作面长度等。第二主参数也用折算值表示，置于主参数之后，用“×”分开，读作“乘”。一般不予表示。

表 2-3　各类主要机床的参数名称及折算系数

机床	主参数名称	折算系数	第二主参数
立式车床	最大车削直径	1/100	—
卧式车床	床身上工件最大回转直径	1/10	最大工件长度
摇臂钻床	最大钻孔直径	1/1	最大跨度
卧式镗床	主轴直径	1/10	—
坐标镗床	工作台工作面宽度	1/10	工作台工作面长度
内圆、外圆磨床	最大磨削直径	1/10	最大磨削长度
矩台平面磨床	工作台工作面宽度	1/10	工作台工作面长度
齿轮加工机床	最大工件直径	1/10	最大模数
龙门铣床	工作台工作面宽度	1/100	工作台工作面长度
立式及卧式升降台铣床	工作台工作面宽度	1/10	工作台工作面长度
龙门刨床	最大刨削宽度	1/100	最大刨削长度
插床及牛头刨床	最大插削及刨削长度	1/10	—
拉床	额定拉力（t）	1/1	最大行程

4. 机床的重大改进序号

当机床的性能和结构布局有重大改进，并按新产品重新设计、试制和鉴定后，在原机床型号的尾部加注重大改进序号，以区别原型号。序号按字母 A，B，C……的顺序选用，但不允许选用“I”、“O”两个字母。

综合上述普通型号的编制方法，举例如下：“MGB1432”，该机床型号中“M”表示类代号（磨床）；“G”表示通用特性代号（高精密）；“B”表示通用特性代号（半自动）；“1”为组代号（外圆磨床组）；“4”表示系代号（万能外圆磨床系）；“32”表示主参数代号（最大磨削外径为 320mm）。



2.5　零件切削加工步骤安排

切削加工步骤安排是否合理，对零件加工质量、生产率及加工成本影响很大。但是，因零件的材料、批量、形状、尺寸大小、加工精度及表面质量等要求不同，切削加工步骤的安排也不尽相同。在单件小批生产，小型零件的切削加工中，通常按以下步骤进行。

2.5.1　阅读零件图

零件图是表达单个零件形状、大小和特征的图样，也是在制造和检验机器零件时所用的图样。在生产过程中，根据零件图样和图样的技术要求进行生产准备、加工制造及检验。因此，它是制造零件的依据，是指导零件生产的重要技术文件，切削加工人员只有在完全读懂图样要求的情况下，才可能加工出合格的零件。

阅读零件图，要了解被加工零件是什么材料，零件上哪些表面要进行切削加工，各加工表面的尺寸、形状、位置精度及表面粗糙度要求，据此进行工艺分析，确定加工方案，为加工出合格零件做好技术准备。阅读零件图的具体步骤如下。

1. 读标题栏

了解零件的名称、材料、画图的比例、重量、单位名称、图样代号和设计、审核、批准等相关技术人员信息，便于了解零件概况，对接相关技术人员。

2. 分析视图，想象形状

结合组合体的读图方法（包括视图、剖视、剖面等），读出零件的内、外形状和结构，从基本视图看出零件的大体内外形状；结合局部视图、斜视图以及剖面等表达方法，读懂零件的局部或斜面的形状；同时，也从设计和加工方面的要求，了解零件的功能作用。

3. 分析尺寸和技术要求

了解零件的设计基准和工艺基准，把握零件各部分的定型、定位尺寸和零件的总体尺寸。还要读懂零件的表面结构、尺寸极限偏差、几何公差等内容。

4. 综合考虑

把读懂的结构形状、尺寸标注和技术要求等内容综合起来，就能比较全面地读懂这张零件图。有时为了读懂比较复杂的零件图，还需参考有关的技术资料，包括零件所在的部件装配图以及与它有关零件图。

2.5.2　零件的预加工

加工前，要对毛坯进行检查，有些零件还需要进行预加工，常见的预加工有划线和钻中心孔。

1. 毛坯划线

零件的毛坯很多是由铸造、锻压和焊接方法制成的。由于毛坯有制造误差，且制造过程中加热和冷却不均匀，产生的内应力，引起的变形，为便于切削加工，加工前要对这些毛坯划线。通过划线确定加工余量、加工位置界线，合理分配各加工面的加工余量，使加工余量不均匀的毛坯免于报废。但在大批量生产中，由于零件毛坯使用专用夹具装夹，则不用划线。

2. 钻中心孔

在加工较长轴类零件时，多采用锻压棒料做毛坯，并在车床上加工。由于轴类零件加工过程中，需多次掉头装夹，为保证各外圆面间同轴度要求，必须建立同一定位基准。同一基准的建立是在棒料两端用中心钻钻出中心孔，工件通过双顶尖装夹进行加工。

2.5.3　选择加工机床及刀具

1. 切削加工机床

根据零件被加工部位的形状和尺寸，选择合适类型的机床，既能保证加工精度和表面质量，又能提高生产率，常见机床用途如下：

（1）车床

主要用于加工各种回转表面和回转体的端面。如车削内外圆柱面、圆锥面、环槽及成形回转表面，车削端面及各种常用的螺纹，配有工艺装备还可加工各种特形面。在车床上还能做钻孔、扩孔、铰孔、滚花等工作。

（2）铣床

一种用途广泛的机床，在铣床上可以加工平面（水平面、垂直面）、沟槽（键槽、T 形槽、燕尾槽等）、分齿零件（齿轮、花键轴、链轮、螺旋形，表面（螺纹、螺旋槽）及各种曲面。此外，还可用于对回转体表面、内孔加工及进行切断工作等。铣床在工作时，工件装在工作台上或分度头等附件上，铣刀旋转为主运动，辅以工作台或铣头的进给运动，工件即可获得所需的加工表面。由于是多刀断续切削，因而铣床的生产率较高。

（3）刨床、插床

主要用于加工各种平面（如水平面、垂直面和斜面及各种沟槽，如 T 形槽、燕尾槽、V 形槽等）、直线成型表面。如果配有仿形装置，还可加工空间曲面，如汽轮机叶轮，螺旋槽等。这类机床的刀具结构简单，回程时不切削，故生产率较低，一般用于单件小批量生产。

（4）镗床

适用于机械加工车间对单件或小批量生产的零件进行平面铣削和孔系加工，主轴箱端部设计有平旋盘径向刀架，能精确镗削尺寸较大的孔和平面。此外还可进行钻、

铰孔及螺纹加工。

（5）磨床

用磨料磨具（砂轮、砂带、油石或研磨料等）作为工具对工件表面进行切削加工的机床，统称为磨床。磨床可加工各种表面，如内外圆柱面和圆锥面、平面、齿轮齿廓面、螺旋面及各种成型面等，还可以刃磨刀具和进行切断等，工艺范围十分广泛。由于磨削加工容易得到高的加工精度和好的表面质量，所以磨床主要应用于零件精加工，尤其是淬硬钢件和高硬度特殊材料的精加工。

（6）钻床

具有广泛用途的通用性机床，可对零件进行钻孔、扩孔、铰孔、锪平面和攻螺纹等加工。在摇臂钻床上配有工艺装备时，还可以进行镗孔；在台钻上配上万能工作台（MDT-180 型），还可铣键槽。

（7）齿轮加工机床

齿轮是最常用的传动件，有直齿、斜齿和人字齿的圆柱齿轮，直齿和弧齿的圆锥齿轮，蜗轮以及非圆形齿轮等。加工齿轮轮齿表面的机床称为齿轮加工机床。

2. 切削刀具

金属切削刀具按切削加工工艺上可分车削刀具（分外圆、内孔、螺纹、切割刀具等）；钻削刀具（包括钻头、铰刀、丝锥等）；镗削刀具；铣削刀具等。刀具的正确选择是机械加工工艺中的重要内容，它不仅影响机床的加工效率，而且直接影响加工质量。刀具的选择原则如下：

（1）尽可能选择大的刀杆横截面尺寸，较短的长度尺寸增加刀具的强度和刚度，减小刀具振动；

（2）选择较大主偏角（大于 75°，接近 90°）；粗加工时选用负刃倾角刀具，精加工时选用正刃倾角刀具；

（3）精加工时选用无涂层刀片及小的刀尖圆弧半径；

（4）尽可能选择标准化、系统化刀具；

（5）选择正确的、快速装夹的刀杆刀柄。

2.5.4　安装工件

工件在切削加工之前，必须将工件牢固地安装在机床工作台或夹具上，并使其相对机床相刀具有一个正确位置。工件安装包括定位和夹紧两个步骤，工件安装时，一般先定位再夹紧，而在三爪卡盘上安装工件时，定位和夹紧是同时进行的。

1. 定位

任何一个工件，在其位置尚未确定前，均具有六个自由度，即即沿空间三个直角坐标轴 x，y，z 方向的移动与绕 x，y，z 轴的转动。分别以 $\vec{x}$、$\vec{y}$、$\vec{z}$ 和、$\overset{\frown}{x}$、$\overset{\frown}{y}$、$\overset{\frown}{z}$所以，要使工件在机床夹具中正确定位，必须限制或约束工件的自由度，如图 2－9 所示工件的六点定位。

在工件定位时，其六个自由度并非在任何情况下都要全部加以限制，需要限制的是影响工件加工精度的自由度。一般在定位中可能出现如下四种情况

（1）完全定位

工件的六个自由度全部被夹具中的定位元件所限制，而在夹具中占有完全确定的

唯一位置，称为完全定位。

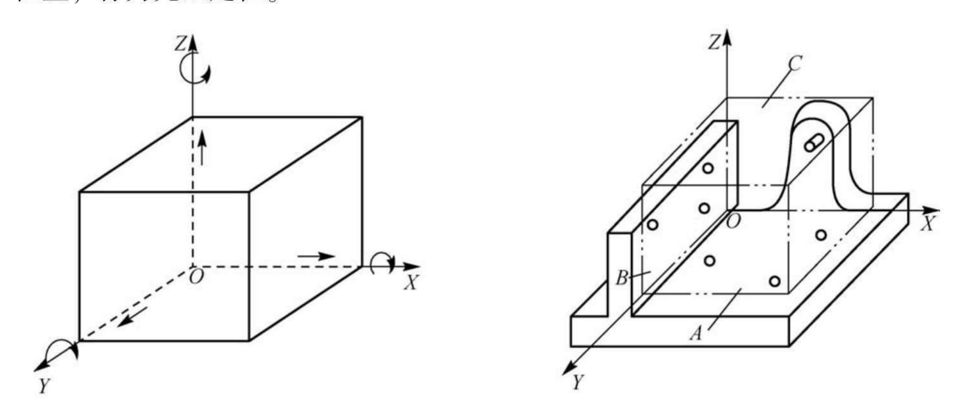


图 2-9　工件的六点定位

（2）不完全定位

根据工件加工表面的不同加工要求，定位支承点的数目可以少于六个。有些自由度对加工要求有影响，有些自由度对加工要求无影响，这种定位情况称为不完全定位。不完全定位是允许的，

（3）欠定位

按照加工要求应该限制的自由度没有被限制的定位称为欠定位。欠定位是不允许的。因为欠定位保证不了加工要求。

（4）过定位

工件的一个或几个自由度被不同的定位元件重复限制的定位称为过定位。当过定位导致工件或定位元件变形，影响加工精度时，应该严禁采用。但当过定位并不影响加工精度，反而对提高加工精度有利时，也可以采用。各类钳加工和机加工都会用到。

2. 安装

在机械加工中，工件常见的安装方式有两种：找正安装和专用夹具安装。

（1）找正安装

工件直接安放在机床工作台或通用夹具（如三爪卡盘、四爪卡盘、平口钳、电磁吸盘等标准附件）上，有时不需要另行找正，可直接进行夹紧，如利用三爪卡盘或电磁吸盘安装工件；有时则需要根据工件上某个表面或划线找正工件，再行夹紧，如在四爪卡盘或在机床工作台上安装工件。

根据找正对象不同，找正安装又分为直接找正安装和划线找正安装。用找正安装方式安装工件时，找正比较费时，且定位精度的高低主要取决于所用工具或仪表的精度，以及工人的技术水平，定位精度不易保证，生产率较低，所以通常仅适用于单件小批量生产。

1）直接找正安装　直接将工件安装在机床上，依据工件上合适的可供找正的表面，利用目测（或划针盘）或百分表（或千分表）进行直接找正，以确定工件在机床上的正确位置，这种安装方法称为直接找正安装。

2）划线找正安装　先由钳工划出被加工表面的轮廓线和中心线，安装时按线进行找正，以确定工件在机床上的正确位置，这种安装方法称为划线找正安装。它适合于形状复杂的工件、余量大且不均匀的毛坯件、位置精度要求高的零件的安装。

（2）专用夹具安装

在批量生产中，为满足加工精度和生产率以及减轻工人劳动强度的要求，常根据工件形状和某一工序的具体要求，设计和制造专用夹具，利用夹具上的定位元件和夹紧机构，不需要进行找正便可以迅速而准确地安装工件。这种工件安装方法称为专用夹具安装，利用专用夹具加工工件，既可保证加工精度，又可提高生产效率，但没有通用性。专用夹具的设计、制造和维修需要一定的投资，所以只有在成批大量生产中，才能取得比较好的效益。

2.5.5　工件的切削加工

一个零件往往有多个表面需要加工，而各表面的质量要求又不相同。为了高效率、高质量、低成本地完成各零件表面的切削加工，要视零件的具体情况，合理地安排加工顺序和划分加工阶段。

1. 加工阶段的划分

（1）粗加工阶段。即用较大的背吃刀量和进给量、较小的切削速度进行切削。这样既可以用较少的时间切除工件上大部分加工余量，提高生产效率，又可为精加工打下良好的基础，同时还能及时发现毛坯缺陷，及时报废或予以修补。

（2）精加工阶段。因该阶段工件加工余量较小，可用较小的背吃刀量和进给量、较大的切削速度进行切削。这样加工产生的切削力和切削热较小，很容易达到工件的尺寸精度、形位精度和表面粗糙度要求。

划分加工阶段除有利于保证加工质量外，还能合理地使用设备。但是，当毛坯质量高、加工余量小、刚性好、加工精度要求不很高时，可不用划分加工阶段，而在一道工序中完成粗、精加工。

2. 工艺顺序的安排

影响加工顺序安排的因素很多，通常考虑以下原则。

（1）基准先行　应在一开始就确定好加工精基准面，然后再以精基准面为基准加工其他表面。一般工件上较大的平面多作为精基准面。

（2）先粗后精　先进行粗加工，后进行精加工，有利于保证加工精度和提高生产率。

（3）先主后次　主要表面是指零件上的工作表面、装配基准面等，它们的技术要求较高，加工工作量较大，故应先安排加工。次要表面（如非工作面、键槽、螺栓孔等）因加工工作量较小，对零件变形影响小，而又多与主要表面有相互位置要求，所以应在主要表面加工之后或穿插其间安排加工。

（4）先面后孔　有利于保证孔和平面间的位置精度。

（5）“一刀活”　指一次装夹中加工出有位置精度要求的各表面。

思考题

1. 什么是切削过程的主运动，什么是切削过程的进给运动，如何区别？
2. 切削过程形成哪三个表面？各表面的含义是什么？
3. 切削三要素是什么，切削加工过程中如何选择？
4. 如何安排零件的切削加工步骤？



第 3 章　切削加工质量评价及常用工具

教学目的和要求：随着现代加工技术的不断发展，切削加工精度要求越来越高，通过本章的学习，可以掌握切削加工质量评价由哪些内容的组成，并了解加工精度的常见检查方法，熟悉熟悉常用量具的工作原理，使用方法及保养常识。



3.1　切削加工质量概述

任何机械产品都是由若干个相互关联的零件装配而成的。零件质量直接影响着产品的性能、寿命、效率、可靠性等质量指标，是保证产品质量的基础。而零件的制造质量，是依靠零件的毛坯制造方法、机械加工、热处理以及表面处理等工艺来保证的。零件的切削加工质量包括切削加工精度和切削加工表面质量。在切削加工过程中，保证机械产品质量，是机械制造的首要任务。因此，在零件制造的各个环节中，应当始终贯彻“质量第一”的思想，以确保产品的质量。

3.1.1　切削加工精度

1. 切削加工精度含义

（1）加工精度和加工误差

在切削加工过程中，由于各种因素的影响，使刀具与工件间正确的相对位置产生偏移，因而加工出的零件，不可能与理想的要求完全符合，这就产生了加工精度和加工误差。加工精度是指零件经机械加工后，其几何参数（尺寸、形状、表面相互位置）的实际值与理想值的符合程度。符合程度越高，加工精度也越高。加工误差是指各几何参数实际值与理想值之差。加工误差越小，加工精度越高。实际生产中，加工精度的高低是用加工误差的大小来评定的。所谓保证和提高加工精度，就是指控制和减少加工误差。研究加工精度，就是通过分析各种因素对加工精度的影响规律，从而找出减少加工误差的工艺措施，把加工误差控制在允许的范围之内。

（2）尺寸、形状和相互位置精度间的关系

零件的尺寸精度、形状精度和相互位置精度之间既有区别又有联系。通常尺寸精度高，其几何形状和相互位置精度也高。例如，为保证轴颈的直径尺寸精度，则轴颈的圆度误差不应超出直径的尺寸公差；又如，两平面本身的平面度很差，就很难保证其平行度。通常，零件的形状误差约占相应尺寸公差的 30%~50%，位置误差约为有关尺寸公差的 65%~85%。然而对于某些配合要求高或有特殊功用的零件，其几何形状和

相互位置精度往往有更高的要求。

2. 获得切削加工精度的方法

（1）获得尺寸精度的方法：有试切法、调整法、定尺寸刀具法和自动控制法等。

（2）获得形状精度的方法：有轨迹法、展成法、仿形法和成形刀具法等。

（3）获得位置精度的方法：零件的相互位置精度，主要由机床精度、夹具精度和工件的装夹精度来保证。其方法有一次装夹获得法、多次装夹获得法、非成形运动法。

3.1.2　切削加工表面质量

切削加工表面层质量对产品的质量有很大的影响。研究表面质量的目的，就是要掌握切削加工中各种工艺因素对表面质量影响的规律，以便应用这些规律控制加工过程，最终达到提高表面质量，提高产品使用性能的目的。任何切削加工方法所获得的加工表面，实际上都不可能是绝对理想的表面。对加工表面的测试和分析可知，零件表面加工后存在着表面粗糙度、表面波度等微观几何形状误差以及划痕、裂纹等缺陷。此外，零件表面层在加工过程中也会产生物理、机械性能的变化。切削加工表面质量主要包括如下内容：

1. 加工表面的几何形状特征

（1）表面粗糙度

表面粗糙度是指零件表面的微观几何形状误差，其波长和波高的比值一般小于 50。其等级用表面的轮廓算术平均偏差 Ra、微观不平度十点高度 R_z 或轮廓最大高度 R_y 的数值大小表示，国家标准推荐优先选用 Ra。

（2）表面波度

表面波度是指介于形状误差与表面粗糙度之间的周期性几何形状误差，主要是由加工过程中工艺系统的振动引起的。一般将零件表面中峰谷的波长 λ 和波高 H_B 之比为 50~1000 的不平程度称为表面波度。

2. 影响切削加工表面质量的因素

影响切削加工表面质量的因素很多，概括为影响加工表面粗糙度和表面波度的因素，因表面波度的影响因素为工艺系统的振动，下面主要讨论影响表面粗糙度的因素。

（1）工件材料

工件材料的力学性能中塑性是影响表面粗糙度的最大因素。塑性较大的材料，加工后表面粗糙度值大，而脆性材料加工后表面粗糙度值比较接近理论值。对于同样的材料，晶粒组织越粗大，加工后的表面粗糙度也越大。为了减小加工后的表面粗糙度，常在切削加工前进行调质处理，以得到均匀细密的晶粒组织和合适的硬度。

（2）刀具几何形状、材料和刃磨质量

刀具的前角对切削加工中的塑性变形影响很大，前角增大，塑性变形减小，表面粗糙度值也将减小。当前角为负值时塑性变形增大，表面粗糙度值增大。增大后角，可以减小刀具后面与加工表面间的摩擦，从而减小表面粗糙度。刃倾角影响着实际前角的大小，对表面粗糙度也有影响。主偏角和副偏角、刀尖圆弧半径从几何因素方面影响着加工表面粗糙度。刀具材料及刃磨质量对产生积屑瘤、鳞刺等影响甚大，选择与工件摩擦系数小的材料（如金刚石）以及提高刀刃的刃磨质量都有助于降低表面粗

糙度值。此外，合理选择冷却液，可以减少材料的变形和摩擦，降低切削区的温度，也可以减小表面粗糙度值。

（3）切削用量

切削用量中对加工表面粗糙度影响最大的是切削速度。实验证明切削速度越高，切剖过程中切屑和加工表面的塑性变形程度越小，表面粗糙度值就越小。积屑瘤和鳞刺都在较低的切削速度范围内产生，采用较高的切削速度能避免积屑瘤和鳞刺对加工表面的影响。

实际生产中，要针对具体问题进行具体分析，抓住影响表面粗糙度的主要因素，才能事半功倍地降低表面粗糙度值。例如，在高速精镗和精车时，如果采用锋利的刀尖和小进给量，则加工轮廓曲线很有规律。若要进一步减小表面粗糙度，必须减小进给量，改变刀具几何参数，并注意在改变刀具几何形状时避免增大塑性变形。



3.2 切削加工质量及检测方法

切削加工质量对产品的工作性能和使用寿命等方面影响很大，零件的切削加工质量包括切削加工精度和切削加工表面质量。

3.2.1 切削加工精度

经过切削加工后，其加工质量主要由加工精度来判断，加工精度在数值上通过加工误差来表示。精度越高，误差越小；反之精度越低，误差就越大。零件的几何参数包括几何形状、尺寸、和相互间的位置关系等方面的内容，故加工精度可用尺寸精度和形状和位置精度来表示。

1. 尺寸精度

尺寸精度是指零件的直径、长度、两平面之间的距离、角度等尺寸的实际数值与理论值的接近程度。尺寸精度用尺寸公差来控制，根据 GB/T 1800. 1-2009《极限与配合基础第 2 部分：公差、偏差和配合的基础》，尺寸公差分 20 个等级，公差代号用符号“IT+阿拉伯数”组成，并将标准公差分为 IT01、IT0、IT1～IT18，共 20 级，IT 表示标准公差，数值越大，精度越低，其中 IT01 级精度要求最高，IT18 级精度要求最低，一般尺寸后未标注公差等级的（即只有尺寸值）按照 IT12 级来制造。

2. 形状和位置精度

形状和位置精度是指加工后零件上的点、线、面的实际形状和位置与理想位置相符合的程度。形状精度和位置精度的最大区别在于前者是单一要素，与其他要素没有关系，如直线度、平面度等：而后者是关联要素，必须与某一要素为基准，如平行度、垂直度等。形状和位置精度用几何公差来控制，按照 GB/T 1182-2008《产品几何技术规范（GPS）几何公差形状、方向、位置和跳动公差标注》规定，几何公差包括形状、方向、位置和跳动公差。几何公差几何特征符号参见表 3－1 几何公差及基本符号

表 3－1　几何公差及基本符号

公差类型	几何特征	符号	有无基准要求	公差类型	几何特征	符号	有无基准要求
形状公差	直线度	⏤	无	位置公差	位置度	⌖	有或无
	平面度	⏥	无		同轴（同心）度	◎	有
	圆度	○	无		对称度	⌯	有
	圆柱度	⌭	无	形状公差 方向公差 位置公差	线轮廓度	⌒	有或无
方向公差	平行度	∥	有		面轮廓度	⌓	有或无
	垂直度	⊥	有	跳动公差	圆跳动	↗	有
	倾斜度	∠	有		全跳动	⌰	有

3.2.2　切削加工表面质量

切削加工表面质量也称表面完整性，它包括加工表面的几何质量和表面材质特性两方面。

1. 表面微观几何质量

表面微观几何质量常采用表面粗糙度来表示。表面粗糙度是指零件在加工过程中由于不同的加工方法、机床与刀具的精度、振动及磨损等因素在加工表面上所形成的具有较小间距和较小峰值的微观不平度。

表面粗糙度对机械零件的耐磨性、耐腐蚀性、抗疲劳强度、接触刚度、配合性能、密封性及测量精度等有直接影响。国家标准 GB/T 131－2009 中规定了多种评定表面粗糙度的指标，其中轮廓的算术平均偏差 Ra 应用最广。表面粗糙度参考值越小，表明零件表面越光洁。

2. 表面材质特性

切削加工过程中由于力和热等因素的综合作用，工件表面层材质的物理力学性能和化学性能发生了一定的变化，主要包括：加工表面层因塑性变形产生的冷作硬化；加工表面层因切削热或磨削热引起的金相组织变化；加工表面层因力或热的作用产生的残余应力。

（1）表面层的冷作硬化

切削加工过程中表面层金属受到切削力和切削热的作用，产生强烈的塑性变形，使表面层的强度和硬度提高，塑性下降，这种现象称为冷作硬化。其实质是使晶格扭曲、畸变，晶粒间产生剪切滑移，晶粒被拉长。

（2）表面层残余应力

机械加工过程中由于切削变形和切削热等作用，机械加工后的工件，一般都存在一定的残余应力。这是由于切削加工中表面层产生了强烈的塑性变形，同时，金相组

织变化造成的体积变化也是产生残余应力的原因之一。

（3）表面层金相组织变化

机械加工过程中，工件表面加工区及其周围在切削热的作用下温度上升，当温度升高到超过工件材料金相组织变化的临界点时，就会发生金相组织变化。

3.2.2 切削加工表面质量检测

加工精度根据不同的加工精度内容以及精度要求，采用不同的测量方法。一般来说有以下几类方法：

1. 按是否直接测量被测参数，可分为直接测量和间接测量。

直接测量：直接测量被测参数来获得被测尺寸。例如用卡尺、比较仪测量。

注：间接测量：测量与被测尺寸有关的几何参数，经过计算获得被测尺寸。

显然，直接测量比较直观，间接测量比较烦琐。一般当被测尺寸或用直接测量达不到精度要求时，就不得不采用间接测量。

2. 按量具量仪的读数值是否直接表示被测尺寸的数值，可分为绝对测量和相对测量。

绝对测量：读数值直接表示被测尺寸的大小、如用游标卡尺测量。

相对测量：读数值只表示被测尺寸相对于标准量的偏差。注：如用比较仪测量轴的直径，需先用量块调整好仪器的零位，然后进行测量，测得值是被侧轴的直径相对于量块尺寸的差值，这就是相对测量。一般说来相对测量的精度比较高些，但测量比较麻烦。

3. 按被测表面与量具量仪的测量头是否接触，分为接触测量和非接触测量。

接触测量：测量头与被接触表面接触，并有机械作用的测量力存在。如用千分尺测量零件。

非接触测量：测量头不与被测零件表面相接触，非接触测量可避免测量力对测量结果的影响。如利用投影法、光波干涉法测量等。

4. 按一次测量参数的多少，分为单项测量和综合测量。

单项测量；对被测零件的每个参数分别单独测量。

综合测量：测量反映零件有关参数的综合指标。如用工具显微镜测量螺纹时，可分别测量出螺纹实际中径、牙型半角误差和螺距累积误差等。

综合测量一般效率比较高，对保证零件的互换性更为可靠，常用于完工零件的检验。单项测量能分别确定每一参数的误差，一般用于工艺分析、工序检验及被指定参数的测量。

5. 按测量在加工过程中所起的作用，分为主动测量和被动测量。

主动测量：工件在加工过程中进行测量，其结果直接用来控制零件的加工过程，从而及时防治废品的产生。

被动测量：工件加工后进行的测量。此种测量只能判别加工件是否合格，仅限于发现并剔除废品。

6. 按被测零件在测量过程中所处的状态，分为静态测量和动态测量。

静态测量；测量相对静止。如千分尺测量直径。

动态测量；测量时被测表面与测量头模拟工作状态中做相对运动。

动态测量方法能反映出零件接近使用状态下的情况，是测量技术的发展方向。



3.3　常用量具使用

为保证零件的加工精度，在加工过程中要对工件进行测量；加工完的零件是否符合设计图纸要求，也要进行检验。这些测量和检验所用的工具称为量具。

由于测量和检验的要求不同，所用的量具也不尽相同。量具的种类很多，常用的有金属尺、卡钳、游标卡尺、外径千分尺、百分尺、万能角度尺、百分表等。

3.3.1　金属直尺、内外卡钳及塞尺

1. 金属直尺

金属直尺为普通测量长度用的简单量具，一般用矩形不锈钢片制成，两边刻有线纹（如图 3－1 所示）。金属直尺的一端成方形为工作端，另一端成半圆形并附悬挂孔可用于悬挂。金属直尺的刻线间距为 1mm，也有的在起始 50mm 内加刻了刻线间距为 0.5mm 的刻度线。由于金属直尺的允许误差为±0.15～±0.3mm，因此，只能用于对准确度要求不高的零件进行测量。金属直尺可用于测量长度、螺距、宽度、直径、深度以及划线等。

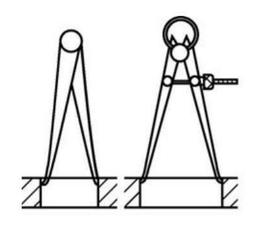


图 3－1　金属直尺

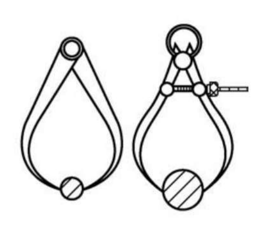
由于金属直尺是一种测量工具，而且还是特殊的金属制作而成，因而在存放时不可以放在潮湿或者有酸性气体的地方，以免钢直尺受到腐蚀或者生锈。在使用完钢直尺测量后，需要把直尺上面的灰尘、油腻等擦拭干净，另外使用机油进行润湿，存放于干燥的环境中。

2. 内外卡钳

内外卡钳是最简单的比较量具，常见内外卡钳有两种（如图 3－2 所示）。外卡钳是用来测量外径和平面的，内卡钳是用来测量内径和凹槽的。它们本身都不能直接读出测量结果，而是把测量得的长度尺寸（直径也属于长度尺寸），在钢直尺上进行读数，或在钢直尺上先取下所需尺寸，再去检验零件的直径是否符合。



(a) 内卡钳

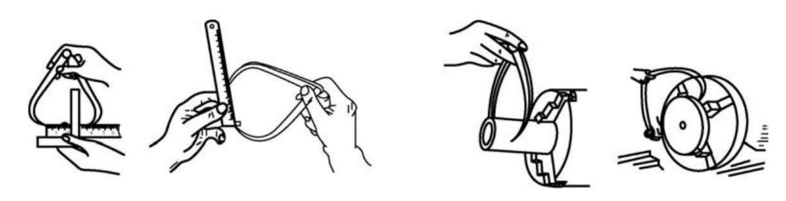


(b) 外卡钳

图 3－2　内外卡钳

（1）外卡钳的使用 先用外卡钳在钢直尺上取下尺寸如图 3－3（a）所示，再用外

卡钳去测量圆柱零件外径，测量时注意要使两个测量面的连线垂直零件的轴线，靠外卡钳的自重滑过零件外圆时，感觉应该是外卡钳与零件外圆正好是点接触，如图 3－3（b）所示。



(a) 外卡钳在钢直尺上取尺寸　　　　(b) 外卡钳测量工件

图 3－3　外卡钳在钢直尺上取尺寸和测量方法

（2）内卡钳的使用 用内卡钳测量内径时，使两个钳脚的测量面的连线正好垂直相交于内孔的轴线，再将卡钳由外至里慢慢移动，可检验孔的圆度公差（如图 3－4 所示）。内卡钳去测量内径，就是比较内卡钳在零件孔内的松紧程度。能有 1～2mm 的自由摆动距离，这时孔径与内卡钳尺寸正好相等。

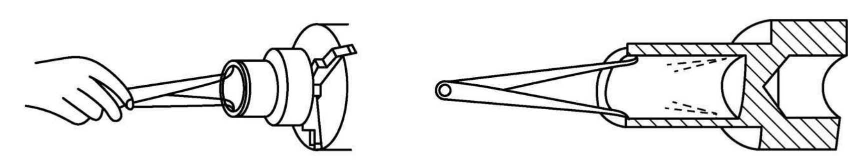


图 3－4　内卡钳测量方法

（3）卡钳的适用范围 卡钳是一种简单的量具，由于它具有结构简单，制造方便、价格低廉、维护和使用方便等特点，广泛应用于要求不高的零件尺寸的测量和检验，尤其是对锻铸件毛坯尺寸的测量和检验，卡钳是最合适的测量工具。

3. 塞尺

塞尺又称厚薄规或间隙片。主要用来检验机床特别紧固面和紧固面、活塞与气缸、活塞环槽和活塞环、十字头滑板和导板、进排气阀顶端和摇臂、齿轮啮合间隙等两个结合面之间的间隙大小。塞尺是由许多层厚薄不一的薄钢片组成，按照塞尺的组别制成一把一把的塞尺，每把塞尺中的每片具有两个平行的测量平面，且都有厚度标记，以供组合使用（如图 3－5 所示）。



图 3－5　塞尺

测量时，根据结合面间隙的大小，用一片或数片重叠在一起塞进间隙内。例如用 0.04mm 的一片能插入间隙，而 0.05mm 的一片不能插入间隙，这说明间隙在 0.04～0.05mm 之间，所以塞尺也是一种界限量规。塞尺使用注意事项如下：

（1）不允许在测量过程中剧烈弯折塞尺，或用较大的力强行将塞尺插入被检测间隙，否则将损坏塞尺的测量表面或零件表面的精度。

（2）使用完后，应将塞尺擦拭干净，并涂上一薄层工业凡士林，然后将塞尺折回夹框内，以防锈蚀、弯曲、变形而损坏。

（3）存放时，不能将塞尺放在重物下，以免损坏塞尺。

3.3.2　游标卡尺

游标卡尺应用游标读数原理制成，常用的量具有游标卡尺，高度游标卡尺、深度游标卡尺和齿厚游标卡尺等，用以测量零件的外径、内径、长度、宽度，厚度、高度、深度等，应用范围非常广泛。

1. 游标卡尺的结构形式

游标卡尺是一种常用的量具，具有结构简单、使用方便、精度中等和测量的尺寸范围大等特点，可以用它来测量零件的外径、内径、长度、宽度、厚度、深度和孔距等，应用范围很广。游标卡尺测量范围为 0~125mm 的制成带有刀口形的上下量爪和带有深度尺的形式（如图 3-6 所示）。另外 0~200mm 和 0~300mm 的制成带有内外测量面的下量爪和带有刀口形的上量爪的型式，测量范围大于 300mm 的游标卡尺，只制成这种仅带有下量爪的形式。

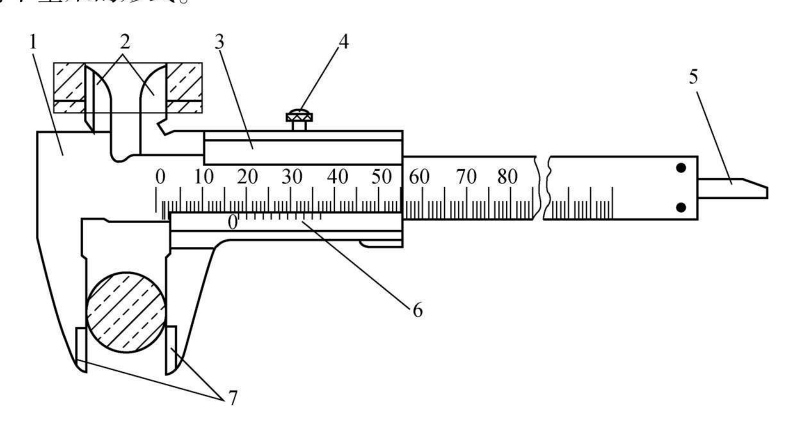


图 3-6　游标卡尺的结构形式之一

1—尺身；2—上量爪；3—尺框；4—紧固螺钉；5—深度尺；6—游标；7—下量爪

2. 游标卡尺的读数原理和读数方法

游标卡尺的读数机构，是由主尺和游标两部分组成。当活动量爪与固定量爪贴合时，游标上的“0”刻线（简称游标零线）对准主尺上的“0”刻线，此时量爪间的距离为“0”。测量零件尺寸的，整数部分可在游标零线左边的主尺刻线上读出来，而比 1mm 小的小数部分，可借助游标读数机构来读出。现以读数值为 0.02mm 的游标卡尺介绍读数原理和读数方法。

游标读数值为 0.02mm 的游标卡尺（如图 3-7（a）所示），主尺每小格 1mm，当两爪合并时，游标上的 50 格刚好等于主尺上的 49mm，则游标每格间距 = 49mm ÷ 50 = 0.98mm，主尺每格间距与游标每格间距相差 = 1 − 0.98 = 0.02（mm），0.02mm 即为此种游标卡尺的最小读数值。

在图3－7（b）中，游标零线在123mm与124mm之间，游标上的11格刻线与主尺刻线对准。所以，被测尺寸的整数部分为123mm，小数部分为11×0.02＝0.22（mm），被测尺寸为123+0.22＝123.22（mm）。

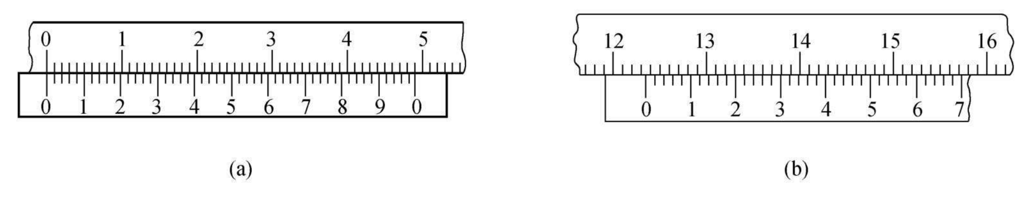


图3－7　游标读数原理

3. 游标卡尺的测量精度

测量或检验零件尺寸时，要按照零件尺寸的精度要求，选用相适应的量具。游标卡尺是一种中等精度的量具，它只适用于中等精度尺寸的测量和检验。用游标卡尺去测量锻铸件毛坯或精度要求很高的尺寸，都是不合理的。前者容易损坏量具，后者测量精度达不到要求，因为量具都有一定的示值误差，游标卡尺的示值误差如表3－2所示。

表3－2　游标卡尺的示值误差 mm

游标读数值	示值总误差
0.02	±0.02
0.05	±0.05
0.10	±0.10

4. 游标卡尺的使用方法

量具使用得是否合理，不但影响量具本身的精度，且直接影响零件尺寸的测量精度，甚至发生质量事故，对国家造成不必要的损失。所以，我们必须重视量具的正确使用，对测量技术精益求精，务使获得正确的测量结果，确保产品质量。

（1）当测量零件的外尺寸时 卡尺两测量面的连线应垂直于被测量表面，不能歪斜。测量时，可以轻轻摇动卡尺，放正垂直位置，如图3－8所示。

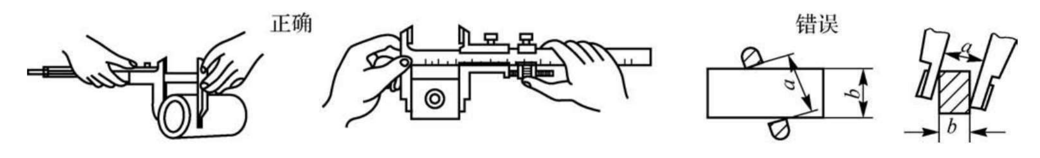
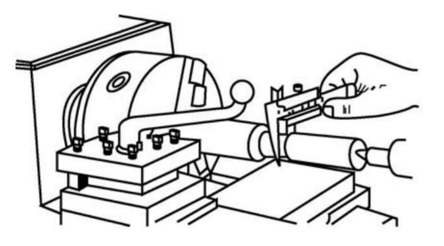
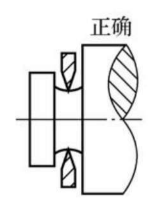


图3－8　测量外尺寸时正确与错误的位置

（2）测量沟槽时 应当用量爪的平面测量刃进行测量，尽量避免用端部测量刃和刀口形量爪去测量外尺寸。而对于圆弧形沟槽尺寸，则应当用刃口形量爪进行测量，不应当用平面形测量刃进行测量，如图3－9所示。

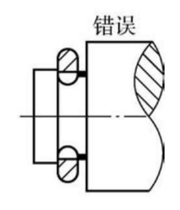


图 3－9　沟槽测量方法

（3）当测量零件的内尺寸时 要使量爪分开的距离小于所测内尺寸，进入零件内孔后，再慢慢张开并轻轻接触零件内表面，用固定螺钉固定尺框后，轻轻取出卡尺来读数。取出量爪时，用力要均匀，并使卡尺沿着孔的中心线方向滑出，不可歪斜，免使量爪扭伤；变形和受到不必要的磨损，同时会使尺框走动，影响测量精度，如图 3－10 所示。

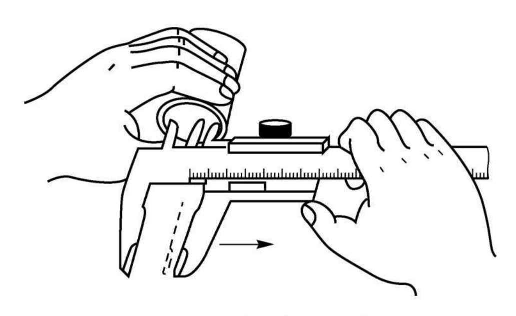


图 3－10　内孔的测量方法

（4）卡尺两测量刃应在孔的直径上，不能偏歪。

（5）用下量爪的外测量面测量内尺寸时，在读取测量结果时，一定要把量爪的厚度加上去。但当量爪磨损和修理后，读数时这个修正值也要考虑进去。

（6）用游标卡尺测量零件时，不允许过分地施加压力，所用压力应使两个量爪刚好接触零件表面。如果测量压力过大，不但会使量爪弯曲或磨损，且量爪在压力作用下产生弹性变形，使测量得的尺寸不准确（外尺寸小于实际尺寸，内尺寸大于实际尺寸）。在游标卡尺上读数时，应把卡尺水平的拿着，朝着亮光的方向，使人的视线尽可能和卡尺的刻线表面垂直，以免由于视线的歪斜造成读数误差。

（7）为了获得正确的测量结果，可以多测量几次。即在零件的同一截面上的不同方向进行测量。对于较长零件，则应当在全长的各个部位进行测量，务使获得一个比较正确的测量结果。

另外，常见的游标卡尺还有高度游标卡尺（如图 3－11）、深度游标卡尺（如图 3－12）。

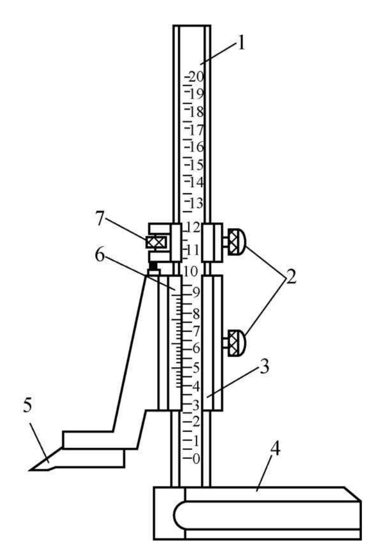


图 3-11 高度游标卡尺

1—主尺；2—紧固螺钉；3—尺框；4—基座；5—量爪；6—游标；7—微动装置

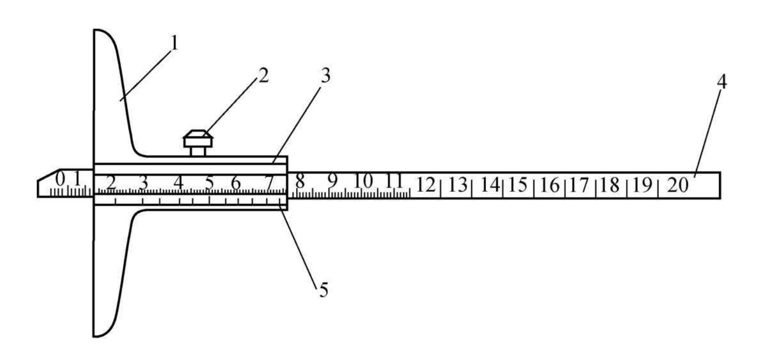


图 3-12 深度游标卡尺

1—测量基座；2—紧固螺钉；3—尺框；4—尺身；5—游标

以上所介绍的各种游标卡尺都存在一个共同的问题，就是读数不很清晰，容易读错。为便于读数准确，提高了测量精度有的卡尺装有测微表成为带表卡尺（如图 3-13 所示）；更有一种带有数字显示装置的游标卡尺（如图 3-14 所示），使用极为方便。

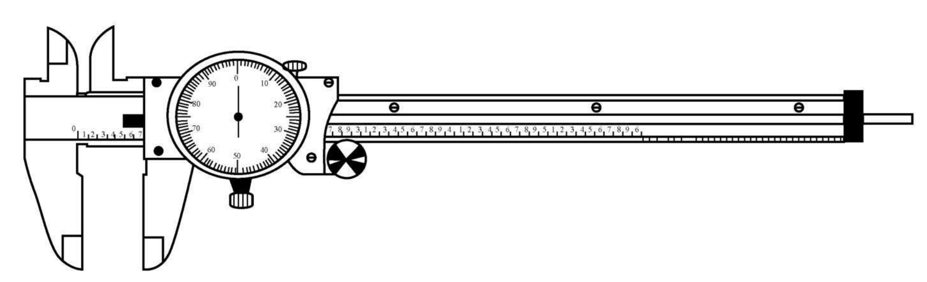


图 3-13 带表卡尺

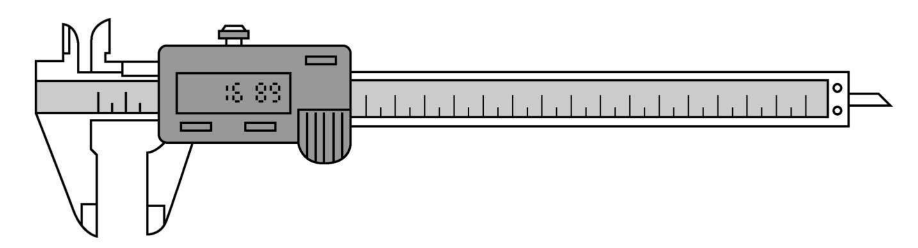


图 3－14　数字显示游标卡尺

5. 游标卡尺使用注意事项：

游标卡尺是比较精密的量具，使用时应注意如下事项。

（1）使用前，应先擦干净两卡脚测量面，合拢两卡脚，检查副尺 0 线与主尺 0 线是否对齐，若未对齐，应根据原始误差修正测量读数。

（2）测量工件时，卡脚测量面必须与工件的表面平行或垂直，不得歪斜。且用力不能过大，以免卡脚变形或磨损，影响测量精度。

（3）读数时，视线要垂直于尺面，否则测量值不准确。

（4）测量内径尺寸时，应轻轻摆动，以便找出最大值。

（5）游标卡尺用完后，仔细擦净，抹上防护油，平放在合内。以防生锈或弯曲。

3.3.3　千分尺（百分尺、螺旋测微器）

千分尺又称螺旋测微器、螺旋测微仪、分厘卡，是应用螺旋测微原理制成的量具。它们的测量精度比游标卡尺高，并且测量比较灵活，因此，当加工精度要求较高时多被应用。常用的螺旋读数量具有百分尺和千分尺。百分尺的读数值为 0.01mm，千分尺的读数值为 0.001mm。目前车间里大量用的是读数值为 0.01mm 的百分尺，现以这种百分尺为主，并适当介绍千分尺的使用知识进行介绍。

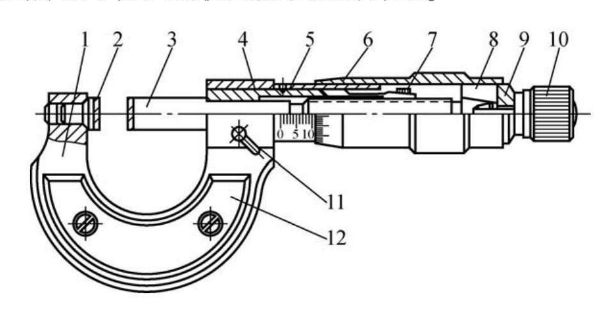


图 3－15　0~25mm 外径百分尺

1—尺架；2—固定测砧；3—测微螺杆；4—螺纹轴套；5—固定刻度套筒；6—微分筒；7—调节螺母；8—接头；9—垫片；10—测力装置；11—锁紧装置；12—绝热板

1. 百分尺的工作原理和读数方法

（1）百分尺的工作原理 如外径百分尺（如图 3－15）的工作原理就是应用螺旋读数机构，它包括一对精密的螺纹——测微螺杆 3 与螺纹轴套 4，和一对读数套筒——固定套筒 5 与微分筒 6。用百分尺测量零件的尺寸，就是把被测零件置于百分尺的两个测量面之间。所以两测砧面之间的距离，就是零件的测量尺寸。当测微螺杆在螺纹轴套

中旋转时，由于螺旋线的作用，测量螺杆就有轴向移动，使两测砧面之间的距离发生变化。常用百分尺测微螺杆的螺距为 0.5mm。因此，当测微螺杆顺时针旋转一周时，两测砧面之间的距离就缩小 0.5mm。当测微螺杆顺时针旋转不到一周时，缩小的距离就小于一个螺距，它的具体数值，可从与测微螺杆结成一体的微分筒的圆周刻度上读出。微分筒的圆周上刻有 50 个等分线，当微分筒转一周时，测微螺杆就推进或后退 0.5mm，微分筒转过它本身圆周刻度的一小格时，两测砧面之间转动的距离为：

$$0.5 \div 50 = 0.01\ (\text{mm})。$$

由此可知：百分尺上的螺旋读数机构，可以正确的读出 0.01mm，也就是百分尺的读数值为 0.01mm。

（2）百分尺的读数方法 在百分尺的固定套筒上刻有轴向中线，作为微分筒读数的基准线。另外，为了计算测微螺杆旋转的整数转，在固定套筒中线的两侧，刻有两排刻线，刻线间距均为 1mm，上下两排相互错开 0.5mm。

百分尺的具体读数方法可分为三步：

1）读出固定套筒上露出的刻线尺寸，一定要注意不能遗漏应读出的 0.5mm 的刻线值。

2）读出微分筒上的尺寸，要看清微分筒圆周上哪一格与固定套筒的中线基准对齐，将格数乘 0.01mm 即得微分筒上的尺寸。

3）将上面两个数相加，即为百分尺上测得尺寸。如图 3－16（a），在固定套筒上读出的尺寸为 8mm，微分筒上读出的尺寸为 27（格）×0.01mm ＝0.27mm，上两数相加即得被测零件的尺寸为 8.27mm；如图 3－16（b）所示，在固定套筒上读出的尺寸为 8.5mm，在微分筒上读出的尺寸为 27（格）×0.01mm ＝0.27mm，上两数相加即得被测零件的尺寸为 8.77mm。

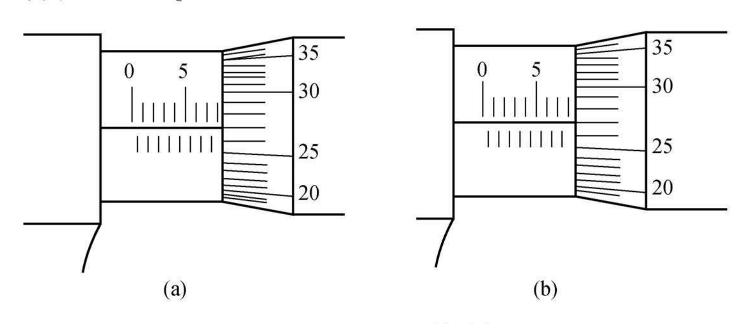


图 3－16　百分尺的读数

5. 常见百分尺（千分尺）介绍

（1）外径百分尺

外径百分尺是最常见的百分尺，主要用于长度、宽度、外径等被测要素测量，具体介绍参见前面对百分尺总体介绍中的说明。

（2）内径百分尺

内径百分尺如图 3－17（a）所示，其读数方法与外径百分尺相同。内径百分尺主要用于测量大孔径，为适应不同孔径尺寸的测量，可以接上接长杆，如图 3－20（b）所示。连接时，只需将保护帽 5 旋去，将接长杆的右端（具有内螺纹）旋在百分尺的左端即可。接长杆可以一个接一个地连接起来，测量范围最大可达到 5000mm。内径百分尺与接长杆是成套供应的。内径百分尺上，没有测力装置，测量压力的大小完全靠

手中的感觉。测量时，是把它调整到所测量的尺寸后，轻轻放入孔内一端不动，另一端作左、右、前、后摆动。

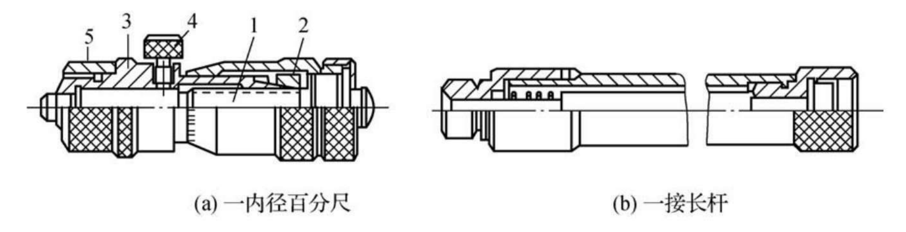


图 3－17　内径百分尺

1—测微螺杆；2—微分筒；3—固定套筒；4—制动螺钉；5—保护螺帽

另外，常见的百分尺还有测量小尺寸内径和内侧面槽的宽度的内测百分尺（如图 3－18 所示），的三爪内径千分尺（如图 3－19 所示），测量外啮合圆柱齿轮的两个不同齿面公法线长度的公法线长度千分尺（如图 3－20 所示）。测量普通螺纹中径的螺纹千分尺（如图 3－21 所示）等。

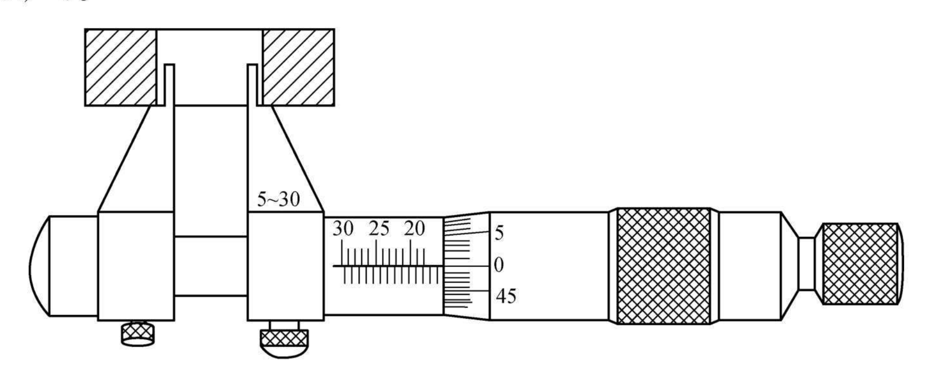


图 3－18　内测百分尺

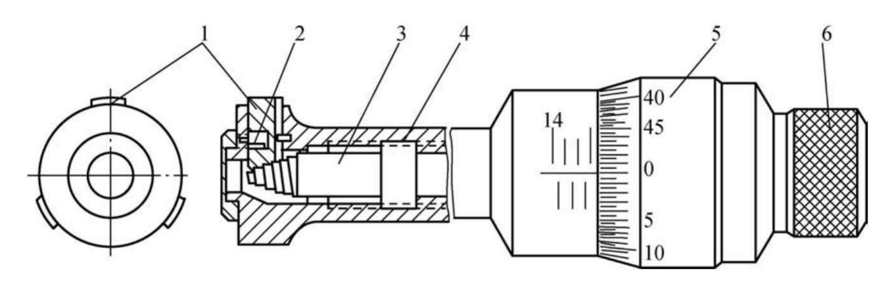


图 3－19　三爪内径千分尺

1—测量爪；2—扭簧；3—测微螺杆；4—螺纹轴套；5—微分筒；6—测力装置

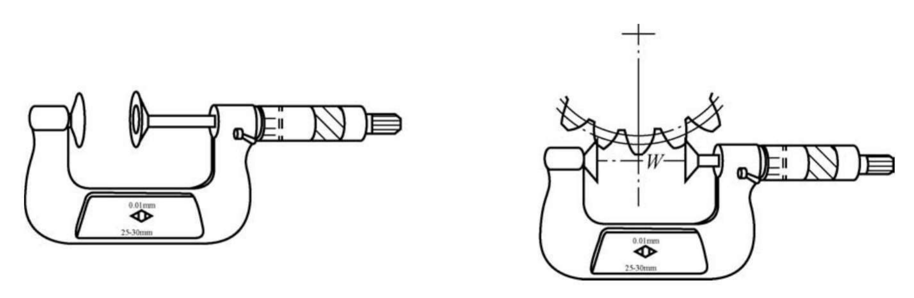


图 3－20　公法线长度千分尺

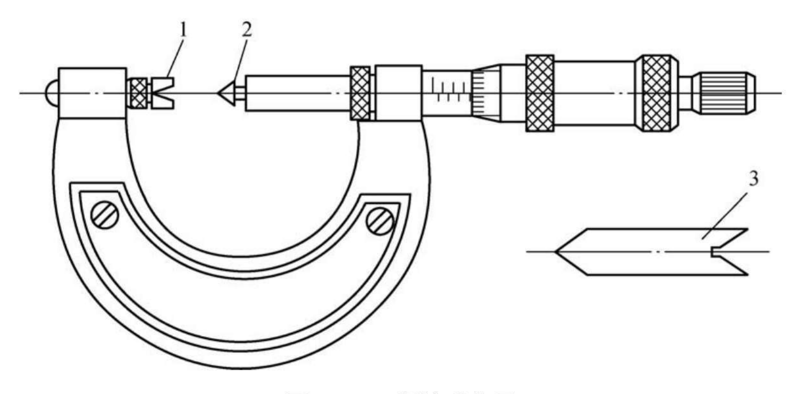


图 3－21　螺纹千分尺

1—测头 1；2—测头 2；3—校正规

6. 百分尺的使用方法及注意事项

百分尺使用得是否正确，对保持精密量具的精度和保证产品质量的影响很大，指导人员和实习的学生必须重视量具的正确使用，使测量技术精益求精，务使获得正确的测量结果，确保产品质量。

使用百分尺测量零件尺寸时，必须注意以下几点。

（1）使用前，应把百分尺的两个测砧面揩干净，转动测力装置，使两测砧面接触（若测量上限大于 25mm 时，在两侧砧面之间放入校对量杆或相应尺寸的量块），接触面上应没有间隙和漏光现象，同时微分筒和固定套筒要对准零位。

（2）转动测力装置时，微分筒应能自由灵活地沿着固定套筒活动，没有任何轧卡和不灵活的现象。如有活动不灵活的现象，应送计量站及时检修。

（3）测量前，应把零件的被测量表面揩干净，以免有脏物存在时影响测量精度。绝对不允许用百分尺测量带有研磨剂的表面，以免损伤测量面的精度。用百分尺测量表面粗糙的零件亦是错误的，这样易使测砧面过早磨损。

（4）用百分尺测量零件时，应当手握测力装置的转帽来转动测微螺杆，使测砧表面保持标准的测量压力，即听到嘎嘎的声音，表示压力合适，并可开始读数。要避免因测量压力不等而产生测量误差。绝对不允许用力旋转微分筒来增加测量压力，使测微螺杆过分压紧零件表面，致使精密螺纹因受力过大而发生变形，损坏百分尺的精度。有时用力旋转微分筒后，虽因微分筒与测微螺杆间的连接不牢固，对精密螺纹的损坏不严重，但是微分筒打滑后，百分尺的零位走动了，就会造成质量事故。

（5）使用百分尺测量零件时，要使测微螺杆与零件被测量的尺寸方向一致。如测量外径时，测微螺杆要与零件的轴线垂直，不要歪斜。测量时，可在旋转测力装置的同时，轻轻地晃动尺架，使测砧面与零件表面接触良好。

（6）用百分尺测量零件时，最好在零件上进行读数，放松后取出百分尺，这样可减少测砧面的磨损。如果必须取下读数时，应用制动器锁紧测微螺杆后，再轻轻滑出零件，把百分尺当卡规使用是错误的，因这样做不但易使测量面过早磨损，甚至会使测微螺杆或尺架发生变形而失去精度。

（7）在读取百分尺上的测量数值时，要特别留心不要读错 0. 5mm。

（8）为了获得正确的测量结果，可在同一位置上再测量一次。尤其是测量圆柱形零件时，应在同一圆周的不同方向测量几次，检查零件外圆有没有圆度误差，再在全

长的各个部位测量几次，检查零件外圆有没有圆柱度误差等。

（9）对于超常温的工件，不要进行测量，以免产生读数误差。

7. 百分尺（千分尺）的保养

（1）使用千分尺要轻拿轻放，必须平放在专用盒内，万一掉在地上或被撞后，应立即检查千分尺 的各部分的相互作用是否符合要求，并校对其“0”位，如有损坏不得自行拆卸千分尺。

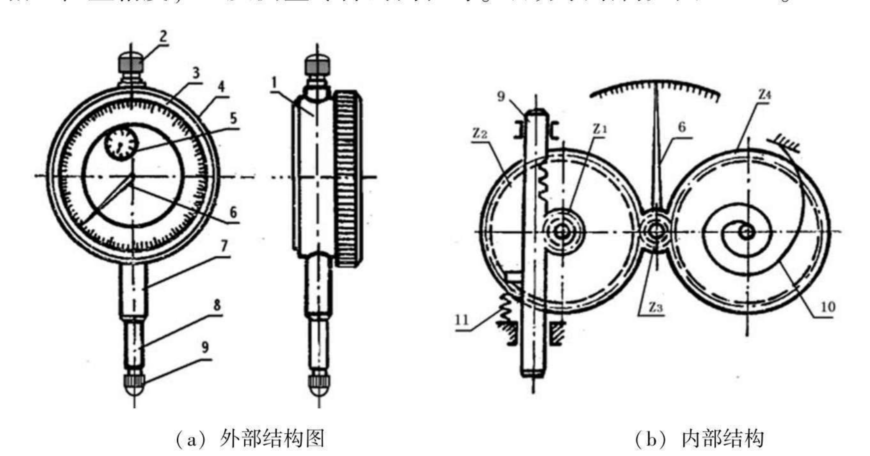
（2）用完千分尺后，需用干净之棉布擦净并涂上防锈油，并将两测量面保持 0.5~2mm 的间隙，然后放入盒内固定位置，存放在干燥、无酸、无振动和磁力的地方。

（3）不准用油石、砂纸等硬物摩擦千分尺的测量面，测微螺杆等部位。

（4）千分尺应实行定期检定，使用千分尺实行厂外进行检定工作。

3.3.4　百分表（千分表）

百分表是以指针指示出测量结果的量具。车间常用的指示式量具有：百分表、千分表、杠杆百分表和内径百分表等。主要用于校正零件的安装位置，检验零件的形状精度和相互位置精度，以及测量零件的内径等。百分表结构如图 3-22。



（a）外部结构图　　（b）内部结构

图 3-22　百分表结构

1—测量杆；2—测量杆用圆头；3—表盘；4—表圈；5—转数指示盘；6—为指针；7—套筒；8—测量杆；9—测量头；10—间隙保持弹簧；11—测量压力弹簧

1. 百分表

（1）百分表和千分表的使用方法

由于千分表的读数精度比百分表高，所以百分表适用于尺寸精度为 IT6~IT8 级零件的校正和检验；千分表则适用于尺寸精度为 IT5~IT7 级零件的校正和检验。百分表和千分表按其制造精度，可分为 0、1 和 2 级三种，0 级精度较高。使用时，应按照零件的形状和精度要求，选用合适的百分表或千分表的精度等级和测量范围。使用百分表和千分表时，必须注意以下几点；

（1）使用前，应检查测量杆活动的灵活性。即轻轻推动测量杆时，测量杆在套筒内的移动要灵活，没有任何轧卡现象，且每次放松后，指针能回复到原来的刻度位置。

（2）使用百分表或千分表时，必须把它固定在可靠的夹持架上（如固定在万能表

架或磁性表座上，如图 3－23 所示)，夹持架要安放平稳，免使测量结果不准确或摔坏百分表。用夹持百分表的套筒来固定百分表时，夹紧力不要过大，以免因套筒变形而使测量杆活动不灵活。

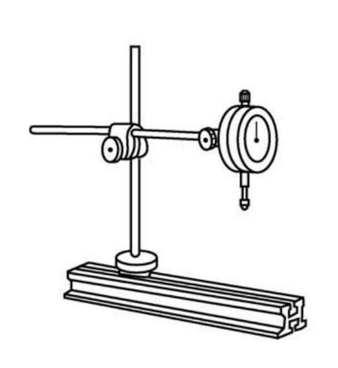
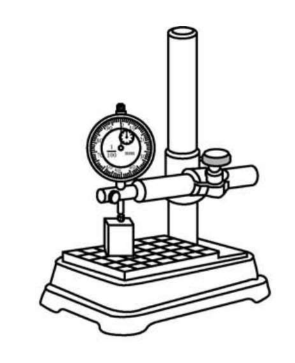
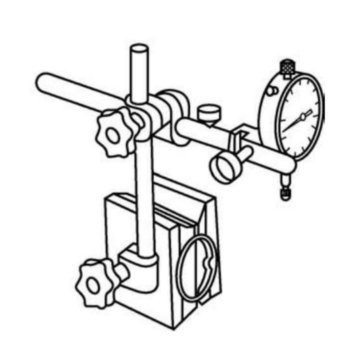




图 3－23　安装在专用夹持架上的百分表

(3) 用百分表或千分表测量零件时，测量杆必须垂直于被测量表面，使测量杆的轴线与被测量尺寸的方向一致，否则将使测量杆活动不灵活或使测量结果不准确。

(4) 测量时，不要使测量杆的行程超过它的测量范围；不要使测量头突然撞在零件上；不要使百分表和千分表受到剧烈的振动和撞击，亦不要把零件强迫推入测量头下，免得损坏百分表和千分表的机件而失去精度。因此，用百分表测量表面粗糙或有显著凹凸不平的零件是错误的。

(5) 用百分表校正或测量零件时，应当使测量杆有一定的初始测力。即在测量头与零件表面接触时，测量杆应有 0.3～1mm 的压缩量（千分表可小一点，有 0.1mm 即可)，使指针转过半圈左右，然后转动表圈，使表盘的零位刻线对准指针。轻轻地拉动手提测量杆的圆头，拉起和放松几次，检查指针所指的零位有无改变。当指针的零位稳定后，再开始测量或校正零件的工作。如果是校正零件，此时开始改变零件的相对位置，读出指针的偏摆值，就是零件安装的偏差数值。

(6) 检查工件平整度或平行度时，将工件放在平台上，使测量头与工件表面接触，调整指针使摆动 1/3～1/2 转，然后把刻度盘零位对准指针，跟着慢慢地移动表座或工件，当指针顺时针摆动时，说明了工件偏高，反时针摆动，则说明了工件偏低了。当进行轴测的时候，就是以指针摆动最大数字为读数（最高点)，测量孔的时候，就是以指针摆动最小数字（最低点）为读数。

(7) 检验工件的偏心度时，如果偏心距较小，可按图 3－31 所示方法测量偏心距，把被测轴装在两顶尖之间，使百分表的测量头接触在偏心部位上（最高点)，用手转动轴，百分表上指示出的最大数字和最小数字（最低点）之差的 就等于偏心距的实际尺寸。偏心套的偏心距也可用上述方法来测量，但必须将偏心套装在心轴上进行测量。

(8) 检验车床主轴轴线对刀架移动平行度时，在主轴锥孔中插入一检验棒，把百分表固定在刀架上，使百分表测头触及检验棒表面，移动刀架，分别对侧母线和上母线进行检验，记录百分表读数的最大差值。

检验刀架移动在水平面内直线度时，将百分表固定在刀架上，使其测头顶在主轴和尾座顶尖间的检验棒侧母线上，调整尾座，使百分表在检验棒两端的读数相等。然后移动刀架，在全行程上检验。百分表在全行程上读数的最大代数差值，就是水平面内的直线度误差。

(9) 在使用百分表和千分表的过程中，要严格防止水、油和灰尘渗入表内，测量

杆上也不要加油，免得粘有灰尘的油污进入表内，影响表的灵活性。

（10）百分表和千分表不使用时，应使测量杆处于自由状态，免使表内的弹簧失效。如内径百分表上的百分表，不使用时，应拆下来保存。

2. 杠杆百分表

杠杆千分表的分度值为 0.002mm，杠杆百分表和千分表的使用方法。

（1）使用注意事项

1）千分表应固定在可靠的表架上，测量前必须检查千分表是否夹牢，并多次提拉千分表测量杆与工件接触，观察其重复指示值是否相同。

2）测量时，不准用工件撞击测头，以免影响测量精度或撞坏千分表。为保持一定的起始测量力，测头与工件接触时，测量杆应有 0.3~0.5mm 的压缩量。

3）测量杆上不要加油，以免油污进入表内，影响千分表的灵敏度。

4）千分表测量杆与被测工件表面必须垂直，否则会产生误差。

5）杠杆千分表的测量杆轴线与被测工件表面的夹角愈小，误差就愈小。如果由于测量需要，α 角无法调小时（当 $\alpha>15°$），其测量结果应进行修正。从图 3－24 可知，当平面上升距离为 α 时，杠杆千分表摆动的距离为 b，也就是杠杆千分表的读数为 b，因为 $b>\alpha$，所以指示读数增大。具体修正计算式如下：

$$a = b\cos\alpha$$

（2）使用方法

杠杆百分表体积较小，适合于零件上孔的轴心线与底平面的平行度的检查，键槽的直线度检查，车床主轴轴向窜动量检查，内外圆同轴度的检验等。

将工件底平面放在平台上，使测量头与 A 端孔表面接触，左右慢慢移动表座，找出工件孔径最低点，调整指针至零位，将表座慢慢向 B 端推进。也可以工件转换方向，再使测量头与 B 端孔表面接触，A、B 两端指针最低点和最高点在全程上读数的最大差值，就是全部长度上的平行度误差。

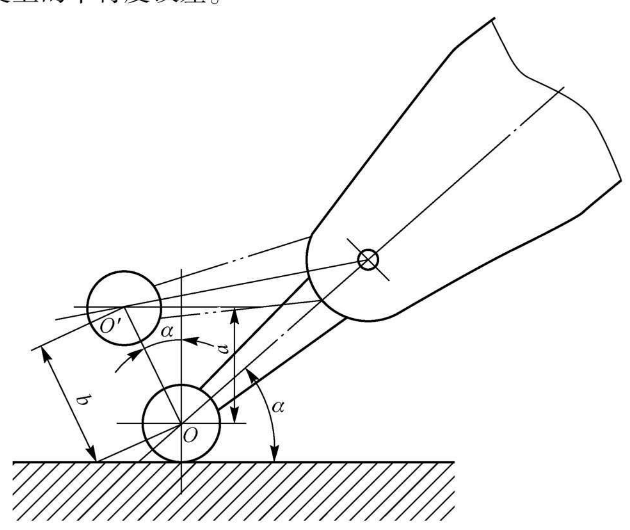


图 3－24　杠杆千分表测杆轴线位置引起的测量误差

3. 内径百分表

（1）内径百分表的结构

内径百分表是内量杠杆式测量架和百分表的组合，如图3－25所示。用以测量或检验零件的内孔、深孔直径及其形状精度。内径百分表活动测头的移动量，小尺寸的只有0~1mm，大尺寸的可有0~3mm，它的测量范围是由更换或调整可换测头的长度来达到的。因此，每个内径百分表都附有成套的可换测头。国产内径百分表的读数值为0.01mm。

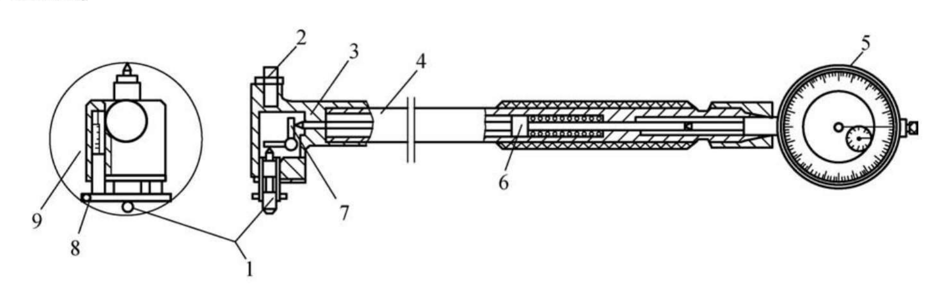


图3－25　内径百分表

用内径百分表测量内径是一种比较量法，测量前应根据被测孔径的大小，在专用的环规或百分尺上调整好尺寸后才能使用。调整内径百分尺的尺寸时，选用可换测头的长度及其伸出的距离（大尺寸内径百分表的可换测头，是用螺纹旋上去的，故可调整伸出的距离，小尺寸的不能调整），应使被测尺寸在活动测头总移动量的中间位置。

（2）内径百分表的使用方法

内径百分表用来测量圆柱孔，它附有成套的可调测量头，使用前必须先进行组合和校对零位。组合时，将百分表装入连杆内，使小指针指在0~1的位置上，长针和连杆轴线重合，刻度盘上的字应垂直向下，以便于测量时观察，装好后应予紧固。

测量前应根据被测孔径大小用外径百分尺调整好尺寸后才能使用，在调整尺寸时，正确选用可换测头的长度及其伸出距离，应使被测尺寸在活动测头总移动量的中间位置。

测量时，连杆中心线应与工件中心线平行，不得歪斜，同时应在圆周上多测几个点，找出孔径的实际尺寸，看是否在公差范围以内。

4. 百分表维护与保养

1）远离液体，不使冷却液、切削液、水或油与内径表接触。

2）在不使用时，要摘下百分表，使表解除其所有负荷，让测量杆处于自由状态。

3）成套保存于盒内，避免丢失与混用。

3.3.4　角度量具

角度量具是用来测量精密零件内外角度或进行角度划线的角度量具，它有以下几种，如万能角度尺、游标量角器等。

1. 万能角度尺

万能角度尺的读数机构，如图3－26所示。是由刻有基本角度刻线的尺座1，和固定在扇形板6上的游标3组成。扇形板可在尺座上回转移动（有制动器5），形成了和游标卡尺相似的游标读数机构。万能角度尺尺座上的刻度线每格1°。由于游标上刻有30格，所占的总角度为29°，因此，两者每格刻线的度数差是2′

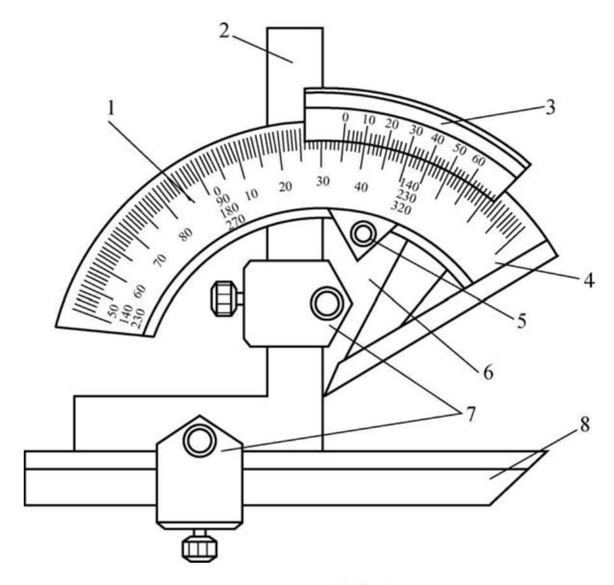


图 3－26　万能角度尺

1—尺座；2—角尺；3—游标 4—基尺；5—制动器；
6—扇形板；7—卡块；8—可移动尺

万能角度尺的读数方法，和游标卡尺相同，先读出游标零线前的角度是几度，再从游标上读出角度“分”的数值，两者相加就是被测零件的角度数值。

在万能角度上，基尺 4 是固定在尺座上的，角尺 2 是用卡块 7 固定在扇形板上，可移动尺 8 是用卡块固定在角尺上。若把角尺 2 拆下，也可把直尺 8 固定在扇形板上。由于角尺 2 和直尺 8 可以移动和拆换，使万能角度尺可以测量 0°～320°的任何角度，如图 3－27 所示。

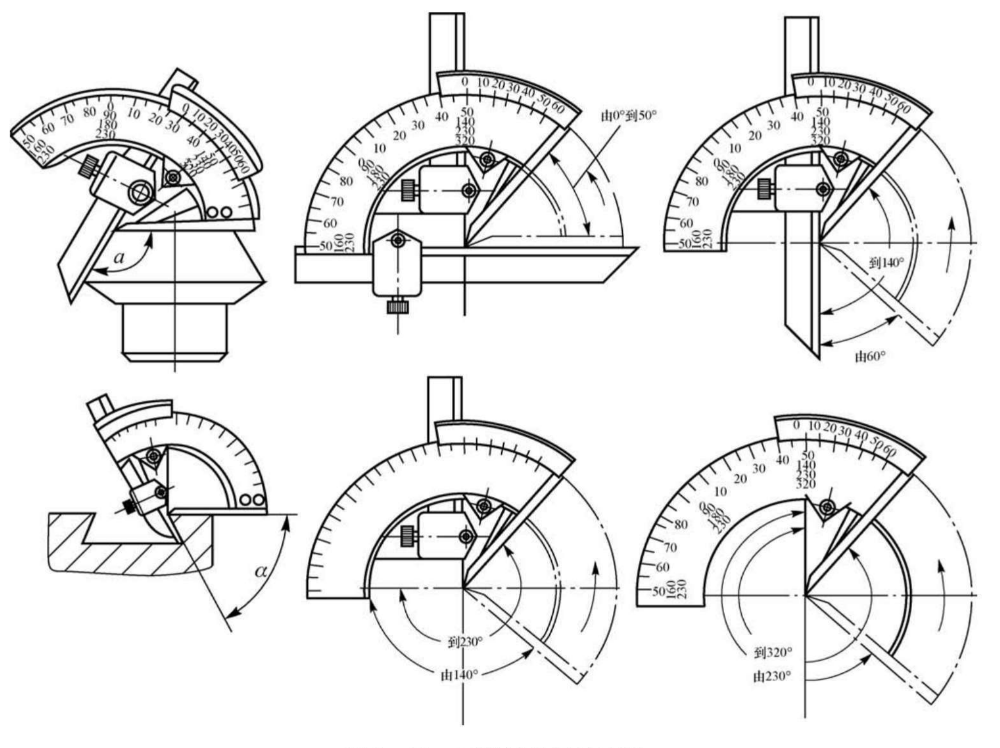


图 3－27　万能量角尺的应用

2. 游标量角器

游标量角器的结构见图 3-28。它由直尺 1、转盘 2、固定角尺 3 和定盘 4 组成。直尺 1 可顺其长度方向在适当的位置上固定，转盘 2 上有游标刻线 5。它的精度为 5′。

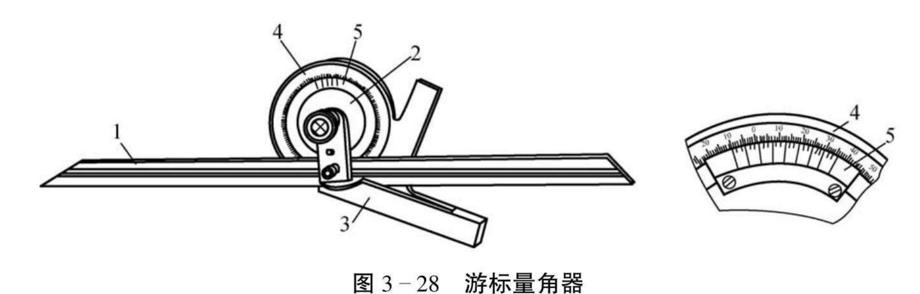


图 3-28 游标量角器

1—尺身；2—转盘；3—固定角尺；4—定盘

游标量角器的各种使用方法示例，如图 3-29。

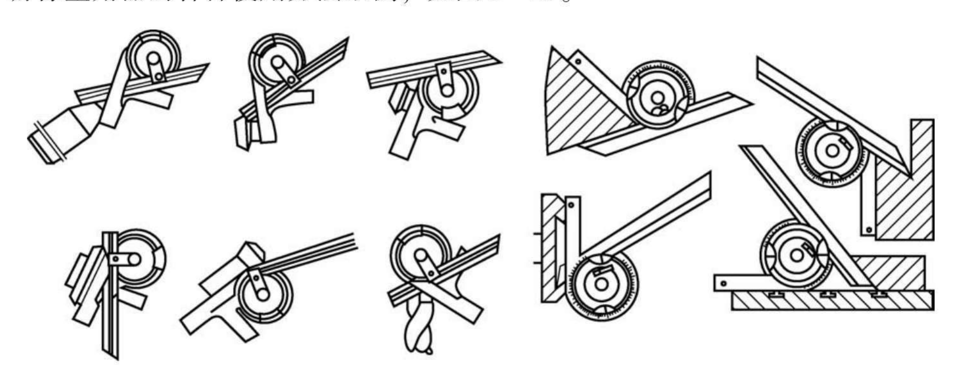


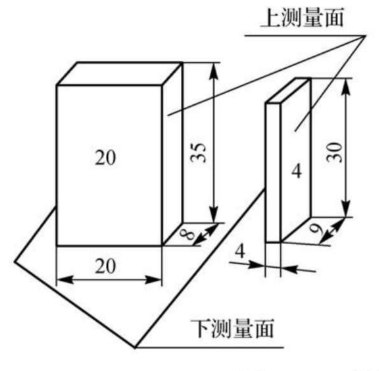
图 3-29 游标量角器的使用方法

3.3.4 量块

1. 量块的用途和精度

量块（如图 3-30）又称块规是用耐磨性好，硬度高而不易变形的轴承钢制成矩形截面的长方块。它是机器制造业中控制尺寸的最基本的量具，是从标准长度到零件之间尺寸传递的媒介，是技术测量上长度计量的基准。量块的工作尺寸是指中心长度，在每块量块上都标记着它的工作尺寸，当量块尺寸等于或大于 6mm 时，工作标记在非工作面上；当量块在 6mm 以下时，工作尺寸直接标记在测量面上。

量块的精度，根据它的工作尺寸的精度和两个测量面的平面平行度的准确程度，分成五个精度级，即 00 级、0 级、1 级 2 级和 3 级。00 级量块的精度最高，3 级量块的精度最低。一般作为工厂或车间计量站使用的量块，用来检定或校准车间常用的精密量具。在量块的选取中尽量减少量块数量。



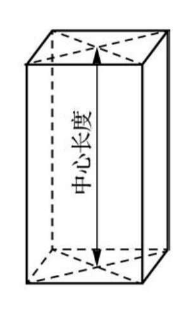


图 3－30　量块

2. 量块使用时注意事项

量块是很精密的量具，使用时必须注意以下几点。

（1）使用前，先在汽油中洗去防锈油，再用清洁的软绸擦干净。不要用棉纱头去擦量块的工作面，以免损伤量块的测量面。

（2）清洗后的量块，不要直接用手去拿，应当用软绸衬起来拿。若必须用手拿量块时，应当把手洗干净，并且要拿在量块的非工作面上。

（3）把量块放在工作台上时，应使量块的非工作面与台面接触。不要把量块放在蓝图上，因为蓝图表面有残留化学物，会使量块生锈。

（4）不要使量块的工作面与非工作面进行推合，以免擦伤测量面。

（5）量块使用后，应及时在汽油中清洗干净，用软绸揩干后，涂上防锈油，放在专用的盒子里。若经常需要使用，可在洗净后不涂防锈油，放在干燥缸内保存。绝对不允许将量块长时间的黏合在一起，以免由于金属黏结而引起不必要损伤。

思考题

1. 切削加工精度含义是什么，切削加工精度包含哪些内容？
2. 游标卡尺的读数原理是什么？
3. 简述千分尺的结构？
4. 简述百分表使用及保养注意事项？

第二篇

材料成型基础



第4章 铸　　造

教学目的和要求：本章实训内容是为强化学生对砂型铸造技能的掌握以及工艺过程等专业知识的理解所开设的一项基本训练科目。通过本章的学习，熟悉砂型铸造生产的工艺过程及其特点，了解手工造型方法的工艺特点，了解合金的熔炼与浇注及铸件质量评价体系，了解铸造车间的安全生产规范，掌握两箱造型的方法、工艺过程、特点和应用。



4.1 铸造概述

铸造是将金属熔炼成符合一定要求的液体并浇进铸型里，经冷却凝固、清整处理后得到有预定形状、尺寸和性能的铸件（零件或毛坯）的工艺过程。现代机械制造工业的基础工艺。铸造生产的毛坯成本低廉，对于形状复杂、特别是具有复杂内腔的零件，更能显示出它的经济性；同时它的适应性较广且具有较好的综合机械性能。但铸造生产所需的材料（如金属、木材、燃料、造型材料等）和设备（如冶金炉、混砂机、造型机、造芯机、落砂机、抛丸机等）较多，且会产生粉尘、有害气体和噪声而污染环境。铸造是人类掌握较早的一种金属热加工工艺，已有约6000年的历史。公元前320年，美索不达米亚出现铜青蛙铸件。公元前13~前10世纪之间，中国已进入青铜铸件的全盛时期，工艺上已达到相当高的水平，如商代的重875千克的司母戊方鼎、战国的曾侯乙尊盘和西汉的透光镜等都是古代铸造的代表产品。早期的铸造受陶器的影响较大，铸件大多为农业生产、宗教、生活等方面的工具或用具，艺术色彩较浓。公元前513年，中国铸出了世界上最早见于文字记载的铸铁件——晋国铸鼎（约270千克重）。公元8世纪前后，欧洲开始生产铸铁件。18世纪的工业革命后，铸件进入为大工业服务的新时期。进入20世纪，铸造的发展速度很快，先后开发出球墨铸铁，可锻铸铁，超低碳不锈钢以及铝铜、铝硅、铝镁合金，钛基、镍基合金等铸造金属材料，并发明了对灰铸铁进行孕育处理的新工艺。20世纪50年代以后，出现了湿砂高压造型，化学硬化砂造型和造芯、负压造型以及其他特种铸造、抛丸清理等新工艺。



4.2 砂型铸造工艺

4.2.1 铸造工艺特点

铸造工艺具有以下特点：

1. 适用范围广，几乎不受零件的形状复杂程度、尺寸大小、生产批量的限制，可以铸造壁厚0.3mm～1m、质量从几克到300多吨的各种金属铸件。

2. 可制造各种合金铸件很多能熔化成液态的金属材料可以用于铸造生产，如铸钢、铸铁、各种铝合金、铜合金、镁合金、钛合金及锌合金等。生产中铸铁应用最广，约占铸件总产量的70%以上。

3. 铸件的形状和尺寸与图样设计零件非常接近，加工余量小；尺寸精度一般比锻件、焊接件高。

4. 成本低廉由于铸造容易实现机械化生产，铸造原料又可以大量利用废、旧金属材料，加之铸造动能消耗比锻造动能消耗小，因而铸造的综合经济性能好。

铸造工艺是机械制造工业中毛坯和零件的主要加工工艺，在国民经济中占有极其重要的地位。铸件在一般机器中占总质量的40%～80%，如内燃机占总质量的70%～90%，机床、液压泵、阀等占总质量的65%～80%，拖拉机占总质量的50%～70%。铸造工艺广泛应用于机床制造、动力机械、冶金机械、重型机械、航空航天等领域。

铸造按生产方法不同，可分为砂型铸造和特种铸造。砂型铸造应用最为广泛，砂型铸件约占铸件总产量的80%以上，其铸型（砂型和芯型）是由型砂制作的。本章主要介绍大量用于铸铁件生产的砂型铸造方法。

4.2.2 砂型铸造生产工序

砂型铸造的主要生产工序有制模、配砂、造型、造芯、合模、熔炼、浇注、落砂、清理和检验。套筒铸件的生产过程如图4-1所示，根据零件形状和尺寸，设计并制造模样和芯盒；配制型砂和芯砂；利用模样和芯盒等工艺装备分别制作砂型和芯型；将砂型和芯型合为一整体铸型；将熔融的金属浇注入铸型，完成充型过程；冷却凝固后落砂取出铸件；最后对铸件清理并检验。

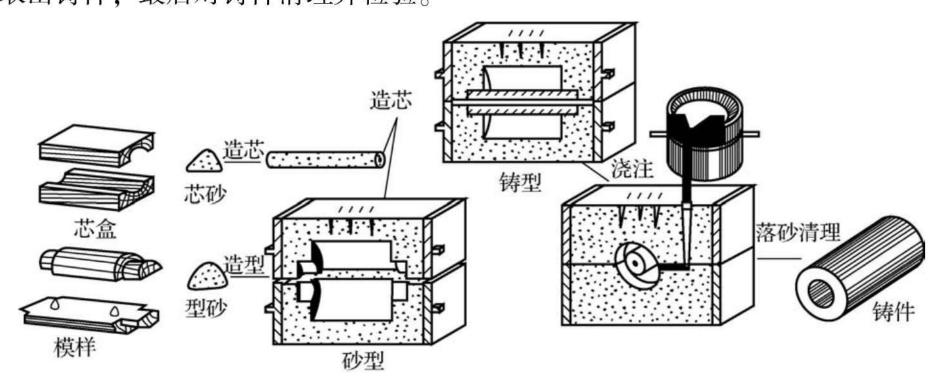


图4-1 砂型铸造的生产过程

4.2.3 铸型的组成和作用

铸型是根据零件形状用造型材料制成的。铸型一般由上砂型、下砂型、型芯和浇注系统等部分组成，如图 4-2 所示。上砂型和下砂型之间的接合面称为分型面。铸型中由砂型面和型芯面所构成的空腔部分，用于在铸造生产中形成铸件本体，称为型腔。型芯一般用来形成铸件的内孔和内腔。金属液流入型腔的通道称为浇铸系统。出气孔的作用在于排出浇铸过程中产生的气体，铸型各部分作用如表 4-1 所示。

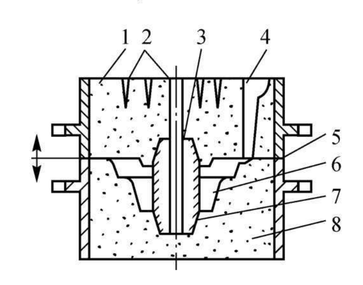


图 4-2 铸型装配图

1—上砂型；2—出孔；3—型芯；4—浇铸系统；
5—分型面；6—型腔；7—芯头芯座；8—下砂型

表 4-1 铸型各部分作用

组元名称	作用
砂箱	造型时填充型砂的容器，分上、中、下等砂箱
铸型	通过造型获得具有型腔的工艺组元，分上中下等铸型
分型面	各铸型组元间的结合面，每一对铸型间都有一个分型面
浇铸系统	金属液流入型腔的通道
冒口	供补缩铸件用的铸型空腔，有些冒口还起观察、排气和集渣的作用
型腔	铸型中由造型材料所包围的空腔部分，也是形成铸件的主要空间
型芯	为获得铸件内部或局部外形，用芯砂制成安放在铸型内部的组元
出气孔	在铸型或型芯上，用针扎出的出气孔，用以排气
出气口	在铸型或型芯中，为排除浇注时形成的气体而设置的沟槽或孔道
冷铁	为加快铸件局部冷却，在铸型型芯中安放的金属物

4.2.4 型（芯）砂的组成和性能

1. 组成

将原砂或再生砂与黏结剂和其他附加物混合制成的物质称为型砂和芯砂。

（1）原砂　原砂即新砂，铸造用原砂一般采用符合一定技术要求的天然矿砂，最常使用的是硅砂。其二氧化硅含量在 80%~98%，硅砂粒度大小及均匀性、表面状态、颗粒形状等对铸造性能有很大影响。除硅砂外的各种铸造用砂称为特种砂，如石灰石砂、锆砂、镁砂、橄榄石砂、铬铁矿砂、钛铁矿砂等，这些特种砂性能较硅砂优良，

但价格较贵，主要用于合金钢和碳钢铸件的生产。

（2）黏结剂　黏结剂的作用是使砂粒粘结在一起，制成砂型和芯型。黏土是铸造生产中用量最大的一种黏结剂，此外水玻璃、植物油、合成树脂、水泥等也是铸造常用的黏结剂。

用黏土作黏结剂制成的型砂又称黏土砂，其结构如图 4－3 所示。黏土资源丰富，价格低廉，它的耐火度较高，复用性好。水玻璃砂可以适应造型、制芯工艺的多样性，在高温下具有较好的退让性，但水玻璃加入量偏高时，砂型及砂芯的溃散性差。油类黏结剂具有很好的流动性和溃散性、很高的干强度，适合于制造复杂的砂芯，浇出的铸件内腔表面粗糙度 *Ra* 值低。

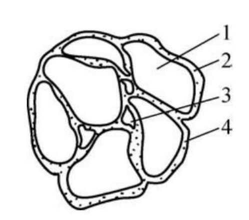


图 4－3　黏土砂结构

1—砂粒；2—黏土；3—孔隙；4—附加物

（3）涂料　涂敷在型腔和芯型表面、用以提高砂（芯）型表面抗粘砂和抗金属液冲刷等性能的铸造辅助材料称为涂料。使用涂料，有降低铸件表面粗糙度值，防止或减少铸件粘砂、砂眼和夹砂缺陷，提高铸件落砂和清理效率等作用。涂料一般由耐火材料、溶剂、悬浮剂、黏结剂和添加剂等组成。耐火材料有硅粉、刚玉粉、高铝矾土粉，溶剂可以是水和有机溶剂等，悬浮剂如膨润土等。涂料可制成液体、膏状或粉剂，用刷、浸、流、喷等方法涂敷在型腔、型芯表面。

型砂中除含有原砂、黏结剂和水等材料外，还加入一些辅助材料如煤粉、重油、锯木屑、淀粉等，使砂型和芯型增加透气性、退让性，提高抗铸件粘砂能力和铸件的表面质量，使铸件具有一些特定的性能。

砂形铸造的造型材料为型砂，其质量好坏直接影响铸件的质量、生产效率和成本。生产中为了获得优质的铸件和良好的经济效益，对型砂性能有一定的要求。

2. 性能

（1）强度　型砂抵抗外力破坏的能力称为强度。它包括常温湿强度、干强度和硬度，以及高温强度。型砂要有足够的强度，以防止造型过程中产生塌箱和浇注时液体金属对铸型表面的冲刷破坏。

（2）成形性　型砂要有良好的成形性，包括良好的流动性、可塑性和不黏膜性，铸型轮廓清晰，易于起模。

（3）耐火性　型砂在高温作用下不熔化、不烧结的性能为耐火性。型砂要有较高的耐火性，同时应有较好的热化学稳定性，较小的热膨胀率和冷收缩率。

（4）透气性　型砂要有一定的透气性，以利于浇注时产生的大量气体的排出。透气性过差，铸件中易产生气孔；透气性过高，易使铸件黏砂。另外，具有较小的吸湿性和较低发气量的型砂对保证铸造质量有利。

（5）退让性　退让性是指铸件在冷凝过程中，型砂能被压缩变形的性能。型砂退让性差，铸件在凝固收缩时将易产生内应力、变形和裂纹等缺陷，所以型砂要有较好

的退让性。

此外，型砂还要具有较好的耐用性、溃散性和韧性等。

4. 2. 5　浇注系统

浇注系统是砂型中引导金属液进入型腔的通道。

1. 对浇注系统的基本要求

浇注系统设计的正确与否对铸件质量影响很大，对浇注系统的基本要求是：

（1）引导金属液平稳、连续的充型，防止卷入、吸收气体和使金属过度氧化。

（2）充型过程中金属液流动的方向和速度可以控制，保证铸件轮廓清晰、完整，避免因充型速度过高而冲刷型壁或砂芯及充型时间不适合造成的夹砂、冷隔、皱皮等缺陷。

（3）具有良好的挡渣、溢渣能力，净化进入型腔的金属液。

（4）浇注系统结构应当简单、可靠，金属液消耗少，并容易清理。

2. 浇注系统的组成

浇注系统一般由外浇口、直浇道、横浇道和内浇道四部分组成，如图 4 – 4 所示。

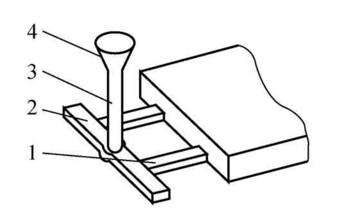


图 4 – 4　浇注系统的组

1—内浇道；2—横浇道；3—直浇道；4—外浇口

（1）外浇口　用于承接浇注的金属液，起防止金属液的飞溅和溢出、减缓对型腔的冲击、分离渣滓和气泡、阻止杂质进入型腔的作用。外浇口分漏斗形（浇口杯）和盆形（浇口盆）两大类。

（2）直浇道　其功能是从外浇口引导金属液进入横浇道、内浇道或直接导入型腔。直浇道有一定高度，使金属液在重力的作用下克服各种流动阻力，在规定时间内完成充型。直浇道常做成上大下小的锥形、等截面的柱形或上小下大的倒锥形。

（3）横浇道　横浇道是将直浇道的金属液引入内浇道的水平通道。作用是将直浇道金属液压力转化为水平速度，减轻对直浇道底部铸型的冲刷，控制内浇道的流量分布，阻止渣滓进入型腔。

（4）内浇道　内浇道与型腔相连，其功能是控制金属液充型速度和方向，分配金属液，调节铸件的冷却速度，对铸件起一定的补缩作用。

3. 浇注系统的类型

浇注系统的类型按内浇道在铸件上的相对位置，分为顶注式、中注式、底注式和阶梯注入式等 4 种类型，如图 4 – 5 所示。

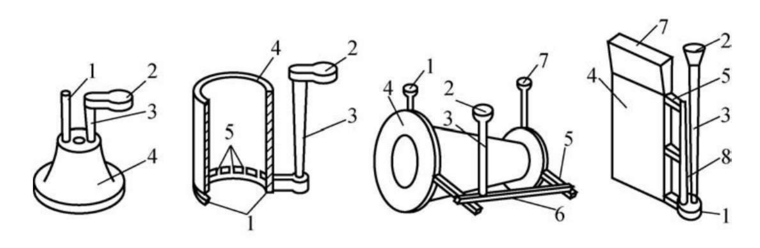


图 4－5　浇注系统的类型

1—出气口；2—浇口杯；3—直浇道；4—铸件；5—内浇道；
6—横浇道；7—冒口；8—分配直浇道

4. 2. 6　冒口和冷铁

为了实现铸件在浇注、冷凝过程中能正常充型和冷却收缩，一些铸型设计中应用了冒口和冷铁。

1. 冒口

铸件浇铸后，金属液在冷凝过程中会发生体积收缩，为防止由此而产生的铸件缩孔、缩松等缺陷，常在铸型中设置冒口。即人为设置用以存储金属液的空腔，用于补偿铸件形成过程中可能产生的收缩，并为控制凝固顺序创造条件，同时冒口也有排气、集渣、引导充型的作用。

冒口形状有圆柱形、球顶圆柱形、长圆柱形、方形和球形等多种。若冒口设在铸件顶部，使铸型通过冒口与大气相通，称为明冒口；冒口设在铸件内部则为暗冒口，如图 4－6 所示。

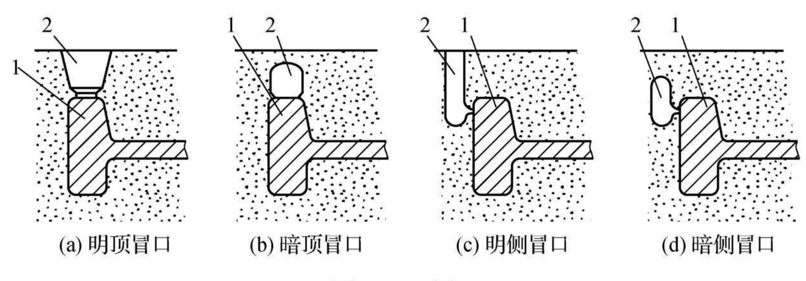


图 4－6　冒口

1—铸件；2—冒口

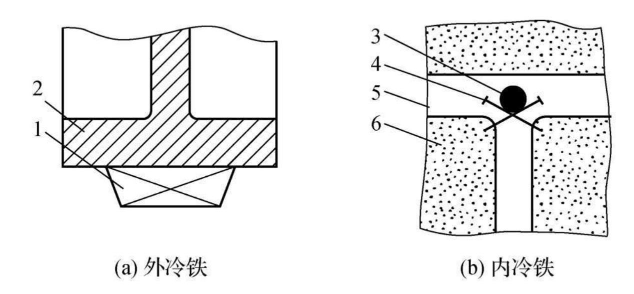
冒口一般应设在铸件壁厚交叉部位的上方或旁侧，并尽量设在铸件最高、最厚的部位，其体积应能保证所提供的补缩液量不小于铸件的冷凝收缩和型腔扩大量之和。

应当说明的是在浇铸冷凝后，冒口金属与铸件相连，清理铸件时，应除去冒口将其回炉。

2. 冷铁

为增加铸件局部冷却速度，在型腔内部及工作表面安放的金属块称为冷铁。冷铁分为内冷铁和外冷铁两大类，放置在型腔内浇铸后与铸件熔合为一体的金属激冷块称为内冷铁，在造型时放在模样表面的金属激冷块为外冷块，如图 4－7 所示。外冷铁一般可重复使用。

冷铁的作用在于调节铸件凝固顺序，在冒口难以补缩的部位防止缩孔、缩松，扩大冒口的补缩距离，避免在铸件壁厚交叉及急剧变化部位产生裂纹。



(a) 外冷铁　　(b) 内冷铁

图 4－7　冷铁

1—冷铁；2—铸件；3—长圆柱形冷铁；4—钉子；5—型腔；6—型砂

4.2.7　（芯）砂的制备

1. 制造基础知识

模样、型腔、铸件和零件之间的尺寸与空间关系

在铸造生产中，用模样制得型腔，将金属液浇入型腔冷却凝固后获得铸件，铸件经切削加工最后成为零件。因此，模样、型腔、铸件和零件四者之间在形状和尺寸上有着必然的联系。搞清它们之间的相互关系对了解铸造工艺过程和读懂铸造工艺图有重要的意义。模样、型腔、铸件和零件之间的关系可如表 4－2 所示。

表 4－2　模样、型腔、铸件和零件之间的关系

特征＼名称	模样	型腔	铸件	零件
大小	大	大	小	最小
尺寸	大于铸件一个收缩率	与模样基本相同	比零件多一个加工余量	小于铸件
形状	包括型芯头、活块、外型芯等形状	与铸件凹凸相反	包括零件中小空洞等不铸出的加工部分	符合零件尺寸
凹凸（与零件相比）	凸	凹	凸	凸
空实（与零件相比）	实心	空心	实心	实心

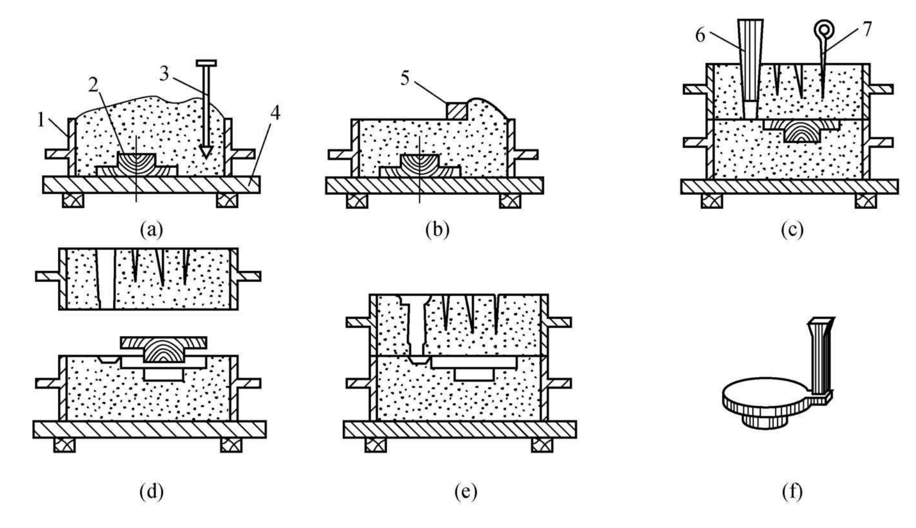
2. 手工造型

造型主要工序为填砂、舂砂、起模和修型。填砂是将型砂填充到已放置好模样的砂箱内，舂砂则是把砂箱内的型砂紧实，起模是把形成型腔的模样从砂型中取出，修型是起模后对砂型损伤处进行修理的过程。手工完成这些工序的操作方式即手工造型。

手工造型方法很多，有砂箱造型、脱箱造型、刮板造型、组芯造型、地坑造型和泥芯块造型等。砂箱造型又可分为两箱造型、三箱造型、叠箱造型和劈箱造型。下面就介绍几种常用的手工造型方法。

（1）两箱造型　两箱造型应用最为广泛，按其模样又可分为整体模样造型和分开

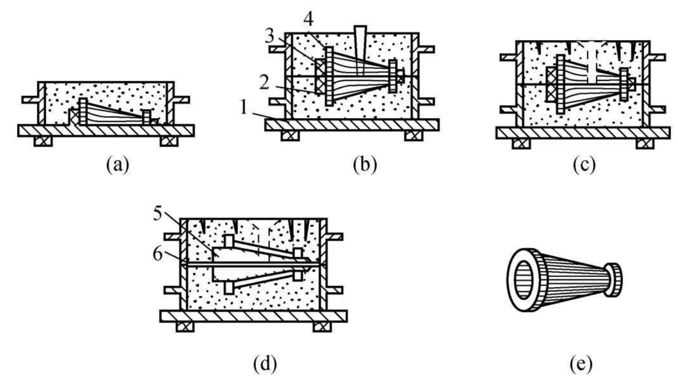
模样造型。整模造型一般用在零件形状简单、最大截面在零件端面的情况，其造型过程如图 4－8 所示。分模造型是将模样从其最大截面处分开，并以此面作分型面。造型时，先将下砂型舂好，然后翻箱，舂制上砂箱，其造型过程如图 4－9 所示。



（a）填砂（b）舂砂（c）翻转下砂型造上砂型、扎排气孔
（d）开箱、起模、开浇道（e）合型（f）带浇道的铸件

图 4－8　整模造型

1—砂箱；2—模样；3—砂舂子；4—模底板；5—刮板；6—浇口棒；7—气孔针

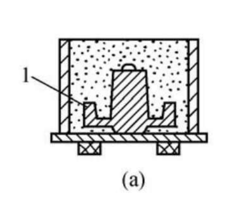


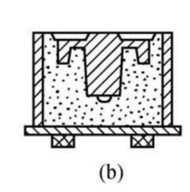
（a）用下半模造下砂型　（b）安上半模，撒分型砂，放浇口棒，造上砂型　（c）开外浇口扎排气孔　（d）起模，开外浇道，下型芯，开排气道，合型　（e）铸件

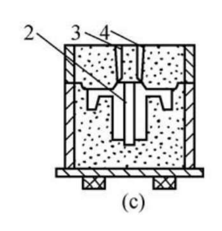
图 4－9　分模造型

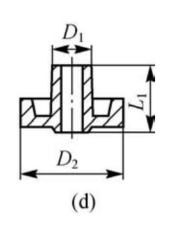
1—　下半模；2—型芯头；3—上半模；4—浇口棒；5—型芯；6—排气孔

（2）挖砂造型　有些铸件的模样不宜做成分开结构，必须做成整体，在造型过程中局部被砂型埋住不能起出模样，这时就需要采用挖砂造型，即沿着模样最大截面挖掉一部分型砂，形成不太规则的分型面，如图 4－10 所示。挖砂造型工作麻烦，适用于单件或小批量的铸件生产。





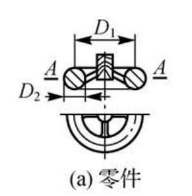


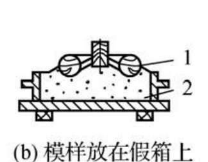


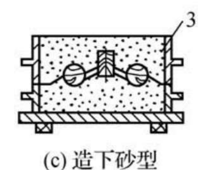
（a）造下砂型　（b）翻箱，挖砂成分型面　（c）撒分型砂，造上砂型起模合型　（d）零件

图 4－10　挖砂造型

（3）假箱造型　假箱造型方式与挖砂造型相近，先采用挖砂的方法做一个不带直浇道的上箱，即假箱，砂型尽量舂实一些，然后用这个上箱作底板制作下箱砂型，然后再制作用于实际浇铸用得上箱砂型，其原理如图 4－11 所示。







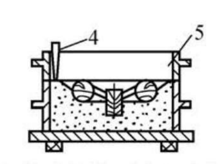
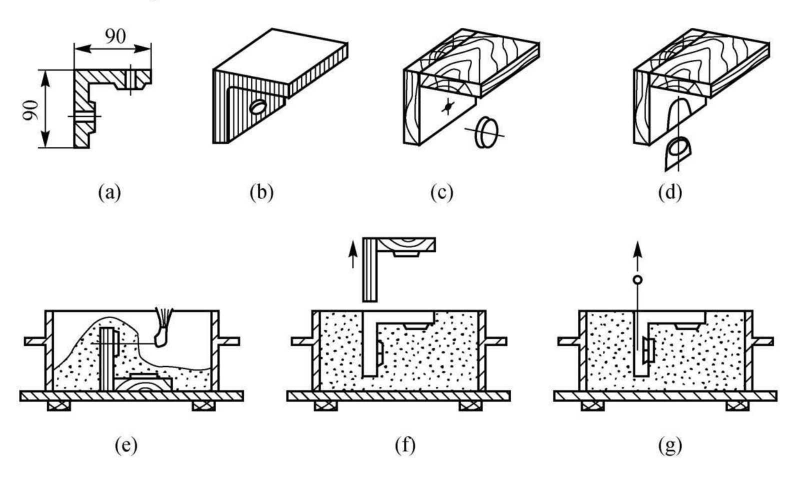


图 4－11　假箱造型

1—模样；2—假箱；3—下砂型；4—浇口棒；5—上砂箱

（4）活块造型　有些零件侧面带有凸台等突起部分时，造型时这些突出部分妨碍模样从砂型中起出，故在模样制作时，将突出部分做成活块，用销钉或燕尾槽与模样主体连接，起模时，先取出模样主体，然后从侧面取出活块，这种造型方法称为活块造型，如图 4－12 所示。



（a）零件；（b）铸件；（c）用销钉连接的活块；（d）用燕尾榫连接的活块；
（e）造下砂型；（f）取出模样本体；（g）取出活块

图 4－12　活块造型

（5）刮板造型　刮板造型适用于单件、小批量生产中、大型旋转体铸件或形状简单铸件，方法是利用刮板模样绕固定轴旋转，将砂型刮制成所需的形状和尺寸，如图 4－13 所示。刮板造型模样制作简单省料，但造型生产效率低，并要求较高的操作技术。

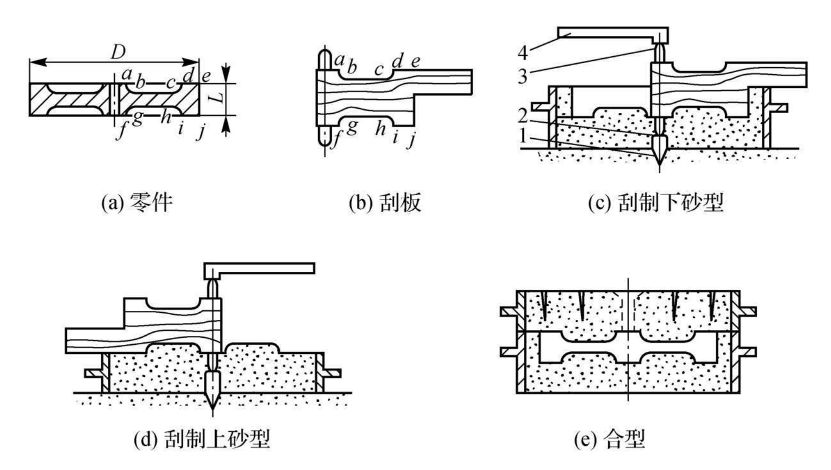


图 4-13　刮板造型

1—木桩；2—下顶针；3—上顶针；4—转动臂

（6）三箱造型对一些形状复杂的铸件，只用一个分型面的两箱造型难以正常取出型砂中的模样，必须采用三箱或多箱造型的方法。三箱造型有两个分型面，操作过程较两箱造型复杂，生产效率低，只适用于单件小批量生产，其工艺过程如图 4-14 所示。

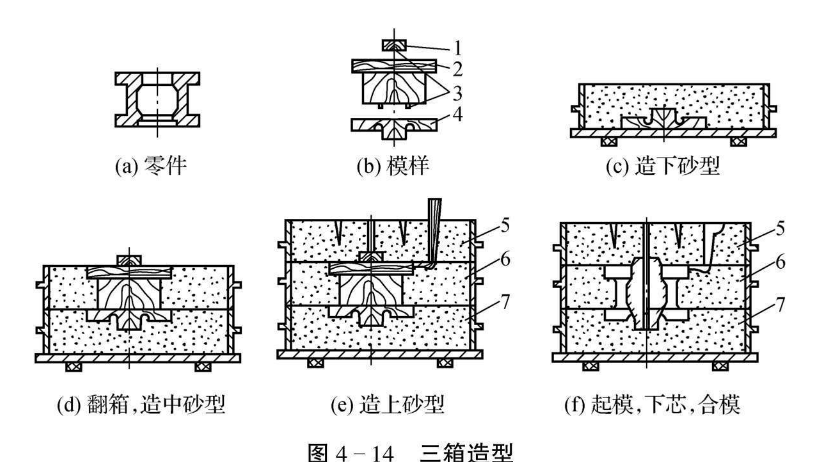


图 4-14　三箱造型

1—上箱模样；2—中箱模样；3—销钉；4—下箱模样；5—上砂型；6—中砂型；7—下砂型



4.3　合金的浇铸

4.3.1　浇铸

浇铸是保证铸件质量的重要环节之一，据统计，铸造生产中，由于浇铸原因而报废的铸件，约占报废件总数的 20%～30%。因此在浇铸过程中，必须严格控制浇铸温度和浇铸速度。

1. 浇铸时应注意事项

（1）浇铸是高温操作，必须注意安全，必须穿着白帆布工作服和工作皮鞋；

（2）浇铸前，必须清理浇铸时行走的通道，预防意外跌撞；

（3）必须烘干烘透浇包，检查砂型是否紧固；

浇包中金属液不能盛装太满，吊包液面应低于包口 100mm 左右，抬包和端包液面应低于包口 60mm 左右。

2. 浇注工艺

（1）浇注温度　金属液浇注温度的高低，应根据铸件材质、大小及形状来确定。浇注温度过低时，铁液的流动性差，易产生浇不足、冷隔、气孔等缺陷；而浇注温度偏高时，铸件收缩大，易产生缩孔、裂纹、晶粒粗大及粘砂等缺陷。铸铁件的浇注温度一般在 1250℃～1360℃之间。对形状复杂的薄壁铸件浇注温度应高些，厚壁简单铸件可低些。

（2）浇注速度　浇注速度要适中，太慢会使金属液降温过多，易产生浇不足、冷隔、夹渣等缺陷；浇注速度太快，金属液充型过程中气体来不及逸出易产生气孔，同时金属液的动压力增大，易冲坏砂型或产生抬箱、跑火等缺陷。浇注速度应根据铸件的大小、形状决定。浇注开始时，浇注速度应慢些，利于减小金属液对型腔的冲击和气体从型腔排出；随后浇注速度加快，以提高生产速度，并避免产生缺陷；结束阶段再降低浇注速度，防止发生抬箱现象。

浇注过程中应注意：浇注前进行扒渣操作，即清除金属液表面的熔渣，以免熔渣进入型腔；浇注时在砂型出气口、冒口处引火燃烧，促使气体快速排出，防止铸件气孔和减少有害气体污染空气；浇注过程中不能断流，应始终使外浇口保持充满，以便熔渣上浮；另外浇注是高温作业，操作人员应注意安全。

3. 铸铁的熔炼

铸铁熔炼可使用多种炉型，如冲天炉、电炉、反射炉等，但应用最广的是冲天炉。冲天炉的规格以其熔化率（t/h）表示。

冲天炉的炉料主要有焦炭、溶剂和金属料。熔化的铁液与消耗的焦炭之重量比称为铁焦比，一般为 8～10。经熔炼后的铁水化学成分将发生变化。含碳量、含硫量增加，而硅和锰有一定的烧损。

将熔化的液态金属注入铸型的过程，称为浇注。浇注不当，可能会使铸件产生气孔、冷隔、浇不足、缩孔等缺陷。

浇铸前应做好现场准备工作，如选好浇包、清理场地等。临浇注时，要扒去金属液面上的熔渣，以免其进入铸型。浇铸时，要合理掌握浇注温度和浇注速度。对复杂件、薄壁件，浇注温度要高，浇注速度要快。而对简单件、厚壁件，则正好相反。

4. 浇注操作

（1）扒渣　即清除金属液表面熔渣的操作过程，以免熔渣进入型腔，产生夹杂等缺陷。扒渣操作要迅速，以免扒渣时间过长，导致金属液温度下降。扒渣时，应从浇包后面或侧面扒出，不可经过浇包嘴，以免将包嘴上的涂料损坏，影响浇注工作进行。正确的扒渣操作如图 4－15 所示。

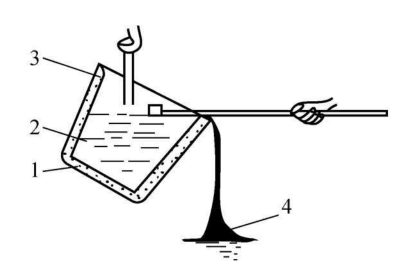
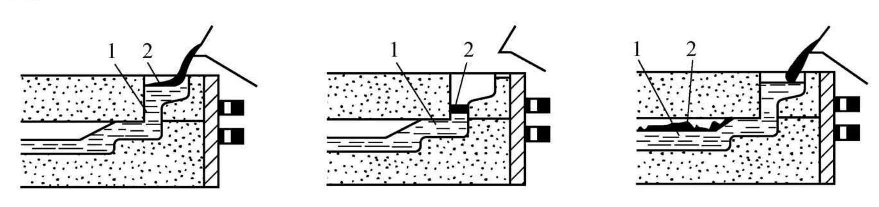


图 4－15　在浇包中扒渣

1—浇包；2—金属液；3—浇包嘴；4—熔渣

（2）引火　在砂型出气冒口和出气孔处，引火燃烧，促使气体快速排出，减少铸件气孔等缺陷。

（3）浇铸　将浇包口或底注口靠近浇口杯，在开始浇注时和将近结束时都应以细流状注入；在整个浇铸过程中，应使浇口杯保持充满状态，以免熔渣卷入型腔，如图 4－16 所示。



（a）浇口杯充满金属液　（b）浇铸中断　（c）中断后再浇注

图 4－16　浇口杯应保持充满金属液

1—金属液；2—熔渣

（4）在浇铸过程中若发现跑火现象，应立即采取抢救措施，同时，还要保持细流浇铸，不能中断。

（5）在浇满的浇冒口上面，加盖干砂、稻草灰或其他保温材料，既可阻止光辐射，又可保温。

（6）当铸件凝固后，进入固态收缩阶段时，应及时卸去压铁，使铸件自由收缩，防止铸件产生变形或裂纹等缺陷。



4.4　铸造技术训练实例

例：现以箱盖零件的铸造为例介绍铸造各工序的实践操作过程。零件图如图 4－17 所示，工序过程如表 4－5 所示。

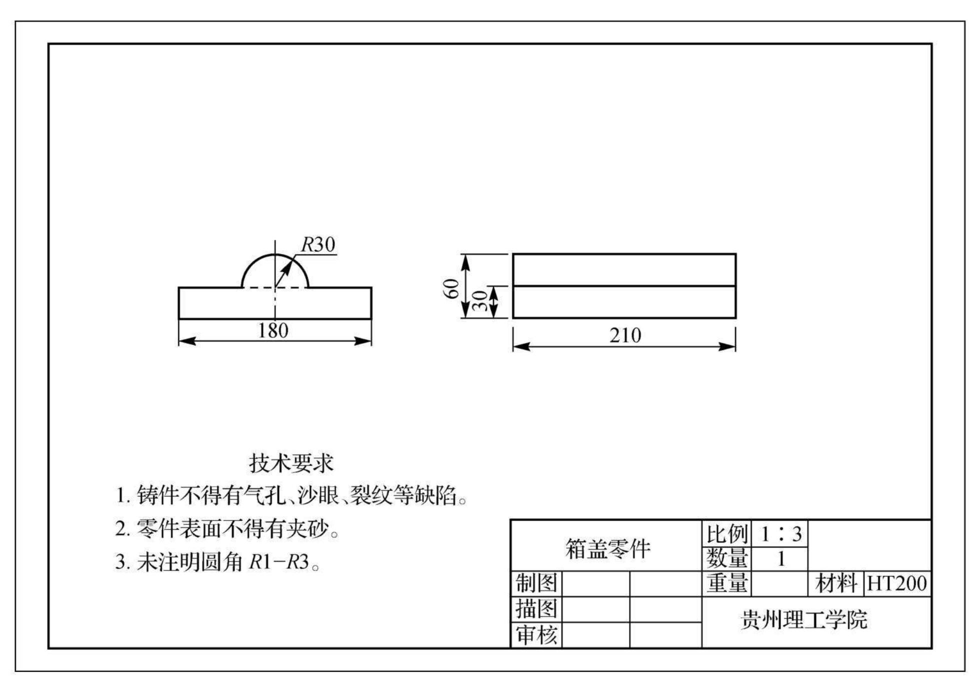


图 4－17　箱盖零件图

表 4－3　箱盖零件铸造加工工序图

操作序号	加工简图	加工内容	工具、量具
1. 安放平板、模样及砂箱		按铸造工艺方案将模样安放在造型平板的适当位置，套上下砂箱，是模样与砂箱内壁之有足够的吃砂量。若模样易粘砂，可撒（或涂）一层防，如石英粉等，撒防粘模材料	粘模材料
2. 填砂和紧实		在安放好的模样表面筛上或铲上一层面砂，将模样盖住在面砂上面铲加一层背砂，用砂舂扁头将分批填入的型砂逐层舂实，填入最后一层背砂，要用砂舂的平头舂实。用刮板刮去型砂上面多余的型砂	铲子、砂舂刮板
3. 修整合翻型		刮去型砂上面多余的背砂后，使其表面与砂箱四边平齐，再用通气针扎出分布均匀、深度适当的出气孔，将一造好的下砂型翻转 180°	通气针
4. 修整分型面		用将分型面模样周围的砂型表面修光压平，撒上一层分型砂，再吹去落在模样上的分型砂	镘刀、皮老虎

续表

操作序号	加工简图	加工内容	工具、量具
5. 放置上型砂箱及撒防粘模材料		将与下砂箱配套的上砂箱安放在下砂型上，在均匀的撒上防粘模材料	防黏模材料
6. 填砂和紧实		先放置浇冒口。浇冒口的位置要合理可靠，先用面砂固定它们的位置。其填砂与舂砂操作与下砂型相同	铲子、砂舂刮板
7. 修整上砂型面及开型		先用刮板刮去多余背砂，使型砂表面与砂箱四边平齐，再用镘刀光平浇冒口出的型砂。用扎出气孔，取出浇冒口模样，在直浇道上端开挖浇口盆。如型砂没有定位装置，则还需要在砂箱外壁上下型相接处，做出定位记号(如泥号粉号)。在取去上型，将上型翻转 180 度后放平	刮板、镘刀、通气针、浇冒口模样
8. 修整分型面		扫除分型面上的分型砂，用掸笔湿润靠近模样周围处的型砂，准备起模	掸笔
9. 敲模和起模		将模样向四周轻轻松动，再用起模针或起模钉将模样从砂型中取出	木锤、模针或起模钉
10. 修型		先开挖浇铸系统的横浇道和内浇道，并修光浇冒口系统表面。将砂型型腔损坏处修好，最后修整光平全部型腔表面	刮板、镘刀
11. 合型		按定位标记将上砂型合在下砂型上，放置适当重量的压铁，抹好箱缝，准备浇注	压铁

续表

操作序号	加工简图	加工内容	工具、量具
12. 取件		铸件浇注后保温一段时间，需从砂型中取出	

思考题

1. 什么是铸造？砂型铸造有哪些主要工序？
2. 铸造工艺有哪些特点？
3. 铸型由哪几部分组成？试说明各部分的作用？
4. 铸造合金由哪些？常用的铸铁有哪几种，其主要成分是什么？
5. 砂型反复使用后，性能为何会降低？



第5章　锻　　造

教学目的和要求：本章让学生了解锻压的实质、特点和应用，自由锻、板料冲压生产常用设备的大体结构和使用方法，锻压生产常用材料、坯料加热目的和方法。熟悉冲压基本工序及简单冲模的结构，熟悉自由锻的基本工序。了解锻压先进工艺。通过实习，要求能用自由锻方法锻制简单锻件，能完成简单件的冲压加工。



5.1　锻造概述

用一定的设备或工具，对金属材料施加外力使其产生塑性变形，从而生产出型材、毛坯或零件的加工方法，总称为金属压力加工。金属压力加工的种类较多，常用方法的分类和应用如表 5－1 所示。锻造和冲压（简称锻压）是其中两类主要的加工方法。

表 5－1　金属压力加工的分类

类型	简图	特点	适用场合及发展趋势
轧制	轧辊 坯料 板材轧制	用轧机和轧辊；加热状态或常温状态；减小坯料截面尺寸，或兼改变截面形状	批量生产钢管、钢轨、角钢、工字钢与各种板料等型材 趋势：高速轧制，线材达 120m/s，板材 30m/s；精密轧制，提高尺寸精度及板形精度；轧锻复合生产钢球、齿轮、轴类、环类零件毛坯，力求少无切削
拉拔	坯料 拉拔模 成品	用拉拔机和拉拔模；常温或低温加热状态；减小坯料截面尺寸，或兼改变坯料截面形状	批量生产钢丝、铜铝电线、漆包线、铜铝电排等丝、带、条状型材。 趋势：高尺寸精度，低表面粗糙度

续表

类型	简图	特点	适用场合及发展趋势
挤压		用挤压机和挤压模；常温或加热状态下，主要改变坯料截面形状	批量生产塑性较好的复杂截面型材，如铝合金门窗构条、铝散热片等或生产毛坯，如齿轮、螺栓、铆钉等，现我国已可生产千余种冷挤零件。 趋势：高速精密，挤锻结合，如用挤锻机可自动、快速将棒料连续挤压成锥齿轮坯，每分钟可达近百件、近百公斤；温挤 45 钢汽车后轴管，重达 9kg
锻造 自由锻		用自由锻锤或压力机和简单工具；一般在加热状态下使坯料成形	单件、小批生产外形简单的各种规格毛坯，如轧辊、大电机主轴等，以及钳工、锻工用的简单工具，也适用于修配场合。 趋势：锻件大型化，提高内在质量；国内已可生产 5 万吨级船用轴系锻件，全纤维船用曲轴锻件已达国际水平；操作机械化
锻造 模锻		用模锻锤或压力机和锻模；一般在加热状态下使坯料成形	批量生产中、小型毛坯（如汽车的曲轴、连杆、齿轮等）和日用五金工具（如手锤、扳手等）趋势：少无切削精密化，如精密模锻叶片、齿轮、锻件公差可达 0.05~0.2mm，还可直接锻出 8~9 级精度的齿形
板料冲压		用剪床、冲床和冲模；一般在常温状态下使板料分离或兼成形	批量生产日用品，如钢、铝制的碗、杯、锅、勺等和电气仪表、汽车等工业领域用的零件或毛坯，如自行车链条片、汽车外壳、油箱等。 趋势：自动化、精密化；精密冲裁尺寸公差可达 0.01mm 之内，粗糙度 $Ra3.6$ ~ 0.2μm；非传统成形工艺发展较快，如旋压、超塑、爆炸成形等

按所使用的设备或工具及成形方式的不同，锻造可分为自由锻和模锻，介于两者之间的过渡方式称为胎模锻。自由锻还可分为手工锻和机器锻。手工自由锻是传统的、原始的生产方式，在现实生产中已基本上为机器锻所取代，故本章只涉及机器锻。经过锻造加工后的金属材料，其内部原有的缺陷（如裂纹，疏松等）在锻造力的作用下可被压合，且形成细小晶粒。因此锻件组织致密、力学性能（尤其是抗拉强度和冲击韧度）比同类材料的铸件大大提高。机器上一些重要零件（特别是承受重载和冲击载荷的）的毛坯，通常用锻造方法生产。除自由锻外，锻造还有较高的生产率和锻件成形精度，因此被广泛应用于金属工艺的各工业领域中，主要缺点是锻件形状的复杂程度（尤其是内腔形状）不如铸件。



5.2 金属的加热与锻件的冷却

用于压力加工的金属必须具有较高的塑性和较低的变形抗力，即有良好的锻造性能。除少数具有良好塑性的金属可在常温下锻造成形外，大多数情况下金属均须通过加热来提高其锻造性能，达到用较小的变形功来获得较大的塑性变形，这就称热锻。热锻工艺包括下料、坯料加热、锻造成形、锻件冷却和热处理等主要过程。

5.2.1 铸造加热设备

按所用能源和形式的不同，锻造炉有多种分类。在锻工实习中常用的是以烟煤为燃料的简易锻造炉，它结构简单，操作容易，但生产率低，加热质量不高，不能符合正规生产的要求。目前常用的工业锻造炉如表 5－2 所示。

表 5－2 常用工业锻造炉

炉型			简图	特点及适用场合
燃料炉	箱式炉	煤气炉重油炉	喷嘴 烟道	加热较迅速，加热质量一般，适于加热大型、单件坯料或成批中、小型坯料。根据不同情况还可间隙或连续加热
电炉	箱式炉	电阻炉	电热体 炉口 炉门 加热室 踏杆	加热温度、炉气成分易控制，加热质量较好，结构简单，适于加热中、小型单件或成批、且加热要求较高的坯料
	特型炉	中频工频感应炉	胚料 线圈 S	感应线圈形状根据坯料形状而制作，加热迅速，效率高，加热质量很好，适于加热批量大、质量要求高的中、小型特定形状坯料

5.2.2 铸造温度范围的确定

坯料开始锻造的温度（始锻温度）和终止锻造的温度（终锻温度）之间的温度间隔，称为锻造温度范围。在保证不出现加热缺陷的前提下，始锻温度应取得高一些，以便有较充裕的时间锻造成形，减少加热次数。在保证坯料还有足够塑性的前提下，终锻温度应定得低一些，以便获得内部组织细密、力学性能较好的锻件，同时也可延长锻造时间，减少加热火次。但终锻温度过低会使金属难以继续变形，易出现锻裂现象和损伤锻造设备。常用钢材的锻造温度范围如表 5－3 所示。

表 5-3　常用钢材的锻造温度范围　　单位：℃

钢　类	始锻温度	终锻温度	钢　类	始锻温度	终锻温度
碳素结构钢	1200~1250	800	高速工具钢	1100~1150	900
合金结构钢	1150~1200	800~850	耐热钢	1100~1150	800~850
碳素工具钢	1050~1150	750~800	弹簧钢	1100~1150	800~850
合金工具钢	1050~1150	800~850	轴承钢	1080	800

5.2.3　胚料的加热缺陷

以碳钢为例：由于加热不当，碳钢在加热时可出现多种缺陷，碳钢常见的加热缺陷如表 5-4 所示。

表 5-4　碳钢常见的加热缺陷

名称	实质	危害	防止（减少）措施
氧化	坯料表面铁元素氧化	烧损材料；降低锻件精度和表面质量；减少模具寿命	在高温区减少加热时间；采用控制炉气成分的少无氧化加热或电加热等
脱碳	坯料表面碳分氧化	降低锻件表面硬度，表层易产生 龟裂	
过热	加热温度过高，停留时间长造成晶粒粗大	锻件力学性能降低，须再经过锻造或热处理才能改善	控制加热温度，减少高温加热时间
过烧	加热温度接近材料熔化温度，造成晶粒界面杂质氧化	坯料一锻即碎，只得报废	
裂纹	坯料内外温差太大，组织变化不匀，造成材料内应力过大	坯料产生内部裂纹，报废	某些高碳或大型坯料，开始加热时应缓慢升温

5.2.4　锻件冷却

为了保证锻件的质量，获得所需的力学性能，必须正确选择锻件的冷却方式。锻件常见的冷却方式如表 5-5 所示。

表 5-5　锻件的冷却方式

方式	特点	适用场合
空冷	锻后置空气中散放，冷速快，晶粒细化	低碳、低合金中小件或锻后不直接切削加工件
坑冷（堆冷）	锻后置干沙坑内或箱内堆在一起，冷速稍慢	一般锻件，锻后可直接切削
炉冷	锻后置原加热炉中，随炉冷却，冷速极慢	含碳或含合金成分较高的中、大件，锻后可切削

5.2.5 锻后热处理

锻件在切削加工前，一般都要进行热处理。热处理的作用是使锻件的内部组织进一步细化和均匀化，消除锻造残余应力，降低锻件硬度，便于进行切削加工等。常用的锻后热处理方法有正火、退火和球化退火等。具体的热处理方法和工艺要根据锻件的材料种类和化学成分确定。



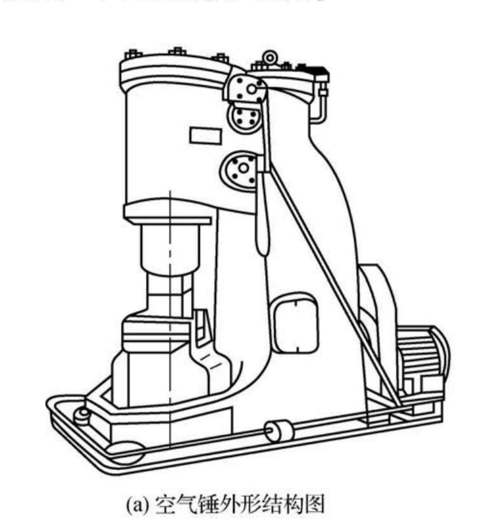
5.3 锻造设备

5.3.1 自由锻设备

自由锻是采用通用工具或直接在锻造设备的上下砥铁间进行锻造的方法。坯料部分表面受到工具限制，其余是未受限制的自由表面。常用的机器自由锻设备有空气锤、蒸气-空气锤和水压机，前两者是利用落下部分的冲击能量，而水压机是用静压力使坯料变形的。由于蒸气-空气锤的数量在逐渐减少，本节择要介绍空气锤和发展前途较好的水压机。

1. 空气锤

（1）结构原理及规格　空气锤是将电能转化为压缩空气的压力能来产生打击力，其外形结构图如图 5-1（a）所示，其原理如图 5-1（b）所示。其规格是以落下部分（也称锤头，包括锤杆、上砧等）的质量来表示的，如 75kg、560kg。空气锤一般用于单件、小批生产的中小型锻件或制坯、修理场合，金工实习中常采用这种设备，而现实生产中已逐渐减少应用。



(a) 空气锤外形结构图

(b) 空气锤原理简图

图 5-1　空气锤

1—工作缸；2—上旋阀；3—压缩缸；4—压缩活塞；5—连杆；6—减速机构；7—电动机；8—脚踏操纵杆；9—砧座；10—下砥铁；11—上砥铁；12—锤杆；13—下旋阀；14—工作活塞

（2）基本操作　接通电源，启动空气锤后通过脚踏杆 8 或手柄（见图 5-1），操

纵上下旋阀 2、13，可使空气锤实现空转、锤头上悬、锤头下压、连续打击和单次打击五种动作，以适应各种加工需要。

①空转　操纵手柄，使锤头靠自重停在下砥铁上，此时电机与传动部分空转，锻锤不工作。

②锤头上悬　改变手柄位置，使锤头保持上悬状态，这时可做各种更换砥铁，放置锻坯、工具或调整，检查，清扫等工作。

③锤头下压　操纵手柄，使锤头向下压紧锻件，在这种状态下可进行锻件弯曲、扭转等操作。

④连续打击　先使锤头处于上悬位置，踏下脚踏杆 8 使锤头上下往复运动，进行连续打击。

⑤单次打击　操纵脚踏杆，使锤头由上悬位置进到连续打击位置，再迅速退回到上悬位置，形成单次打击。连续打击和单次打击力的大小，是通过踏杆转角大小来控制的

2. 水压机

水压机是通过 20~40MPa 的高压水进入工作缸，从而产生很大的静压力作用于坯料来进行锻压的。其本体结构如图 5－2 所示。其规格是由标称压力的大小来表示的，如 8000kN（800t）、125000kN（12 500t）。水压机主要用于单件、小批生产中、大型锻件。水压机主体庞大，还须配备供水和操作系统，另外，还要配备大型加热、起重设备和操作机，因此投资较大，但由于其作用于坯料上的静压力时间较长，有利于将锻件的整个截面锻透，且工作时振动小、劳动条件好，因此逐步得到广泛应用，尤其是生产大型锻件所必不可少的锻造设备。

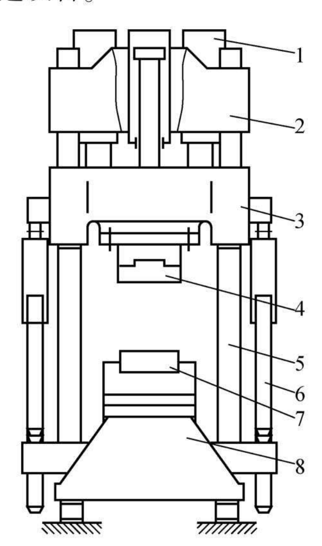


图 5－2　三梁四柱锻造水压机外形简图

1—工作缸；2—上横梁；3—活动横梁；4—上砧座；5—立柱；
6—活动横梁提升缸；7—下砧座；8—下横梁

5.3.2　模锻设备

模锻时，较精密的锻模要固定在模锻设备上，因此模锻设备与自由锻设备相比，

其机身刚度较大，安装上模的滑块导轨，运动精度较高，还有顶出锻件的机构等。模锻设备种类很多，大致可分锤、液压机、机械压力机、螺旋压力机等，其中压力机模锻有较大的发展前途，因此其使用比重逐年加大。故本节仅介绍热模锻压力机，其外形如图 5 - 3 所示，工作原理如图 5 - 4 所示，其规格是以能产生的标称压力来表示的，如 25000kN（2 500t）、63000kN（6300t）等。

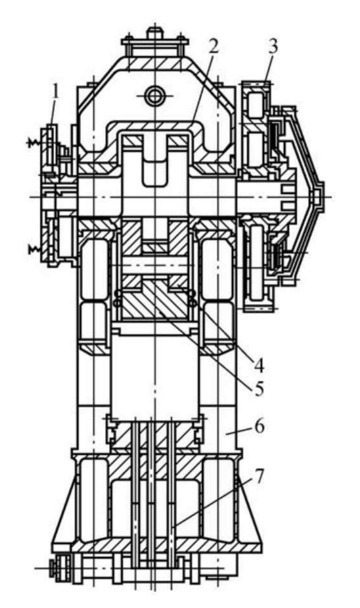


图 5 - 3　热模锻压力机外形结构图

1—制动器；2—曲轴；3—大齿轮及离合器；4—连杆；5—滑块；6—机身；7—下顶杆

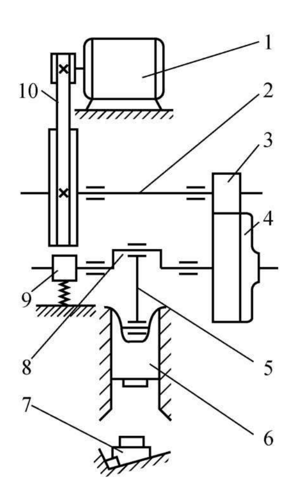


图 5 - 4　机械式压力机工作原理图

1—电动机；2—传动轴；3—齿轮；4—离合器；5—连杆；6—滑块；7—工作台；8—曲轴；9—制动器；10—三角皮带



5.4　自由锻造

将坯料置于铁砧上或锻压机器的上、下砥铁之间直接进行锻造，称为自由锻造（简称自由段）。前者称为手工自由锻（简称手锻），后者称为机器自由锻（简称机锻）。自由锻生产率低，劳动强度大，锻件的精度低，对操作工人的技术水平要求高。但其所用的工具简单，设备通用性强，工艺灵活。所以广泛用于单件、小批量零件的生产，对于制造重型锻件，自由锻则是唯一的加工方法。自由锻常用的设备有空气锤、蒸汽—空气锤及水压机等。

5.4.1　自由锻造的基本工序及其操作

自由锻的基本工序分为基本工序、辅助工序和精整工序 3 类。基本工序是实现锻件基本成形的工序，如镦粗、拔长、冲孔、弯曲、切割等；辅助工序是为基本工序操

作方便而进行的预先变形工序，如压钳口、压肩、钢锭倒棱等；修整工序是用以减少锻件表面缺陷而进行的工序，如校正、滚圆、平整等。

实际生产中最常用的是镦粗、拔长、冲孔 3 个基本工序。

1. 镦粗

镦粗（如图 5-5 所示）是使坯料截面增大，高度减小的锻造工序，有完全镦粗和局部镦粗两种。完全镦粗是将坯料直立在下砧上进行锻打，使其沿整个高度产生高度减小。局部镦粗分为端部镦粗和中间镦粗，需要借助于工具如胎模或漏盘（或称垫环）来进行。镦粗操作的工艺要点如下。

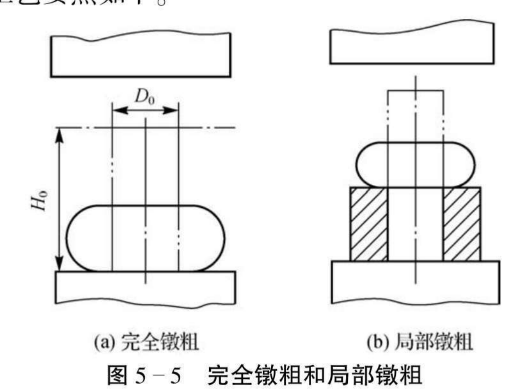


图 5-5　完全镦粗和局部镦粗

（1）坯料的高径比，即坯料的高度 H_0 和直径 D_0 之比，应不大于 2.5~3。高径比过大的坯料容易镦弯或造成双鼓形，甚至发生折叠现象而使锻件报废。

（2）为防止镦歪，坯料的端面应平整并与坯料的中心线垂直，端面不平整或不与中心线垂直的坯料，镦粗时要用钳子夹住，使坯料中心与锤杆中心线一致。

（3）镦粗过程中如发现镦歪、镦弯或出现双鼓形应及时矫正。

（4）局部镦粗时要采用相应尺寸的漏盘或胎模等工具。

2. 拔长

拔长是使坯料长度增加、横截面减少的锻造工序。操作中还可以进行局部拔长、芯轴拔长等。拔长操作的工艺要点如下：

（1）送进锻打过程中，坯料沿砥铁宽度方向（横向）送进，每次送进量不宜过大，以砥铁宽度的 0.3~0.7 倍为宜，如图 5-6（a）所示。送进量过大，金属主要沿坯料宽度方向流动，反而降低延伸效率，如图 5-6（b）所示。送进量太小，又容易产生夹层，如图 5-6（c）所示。

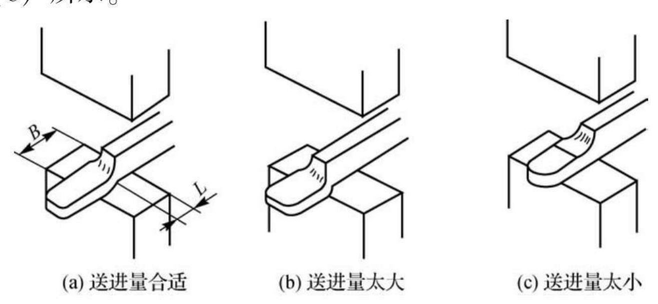


图 5-6　拔长时的送进方向和送进量

（2）翻转拔长过程中应不断翻转坯料，除了如图 5－7 所示按数字顺序进行的两种翻转方法外，还有螺旋式翻转拔长方法。为便于翻转后继续拔长，压下量要适当，应使坯料横截面的宽度与厚度之比不要超过 2. 5，否则易产生折叠。

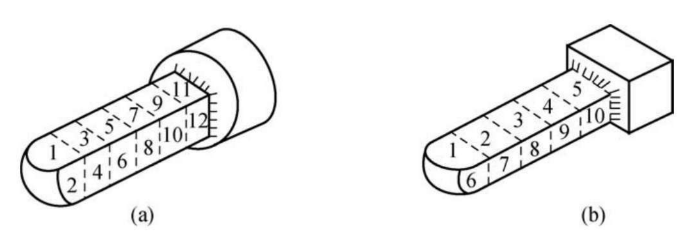


图 5－7　拔长时锻件的翻转方法

（3）锻打将圆截面的坯料拔长成直径较小的圆截面时，必须先把坯料锻成方形截面，在拔长到边长接近锻件的直径时，再锻成八角形，最后打成圆形，如图 5－8 所示。

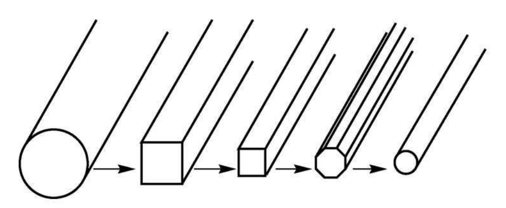


图 5－8　圆截面坯料拔长时横截面的变化

（4）锻制台阶或凹档要先在截面分界处压出凹槽，称为压肩。

（5）修整拔长后要进行修整，以使截面形状规则。修整时坯料沿砥铁长度方向（纵向）送进，以增加锻件与砥铁间的接触长度和减少表面的锤痕。

3. 冲孔

在坯料上冲出通孔或不通孔的工序称为冲孔。冲孔分双面冲孔和单面冲孔，如图 5－9、图 5－10 所示。单面冲孔适用于坯料较薄场合。其操作工艺要点如下。

（1）冲孔前，坯料应先镦粗，以尽量减小冲孔深度。

（2）为保证孔位正确，应先试冲，即用冲子轻轻压出凹痕，如有偏差，可加以修正。

（3）冲孔过程中应保证冲子的轴线与锤杆中心线（即锤击方向）平行，以防将孔冲歪。

（4）一般锻件的通孔采用双面冲孔法冲出，即先从一面将孔冲至坯料厚度 3/4～2/3的深度再取出冲子，翻转坯料，从反面将孔冲透。

（5）为防止冲孔过程中坯料开裂，一般冲孔孔径要小于坯料直径的 1/3。大于坯料直径的 1/3 的孔，要先冲出一较小的孔。然后采用扩孔的方法达到所要求的孔径尺寸。常用的扩孔方法有冲头扩孔和芯轴扩孔。冲头扩孔利用扩孔冲子锥面产生的径向分力将孔扩大，芯轴扩孔实际上是将带孔坯料沿切向拔长，内外径同时增大，扩孔量几乎不受什么限制，最适于锻制大直径的薄壁圆环件。

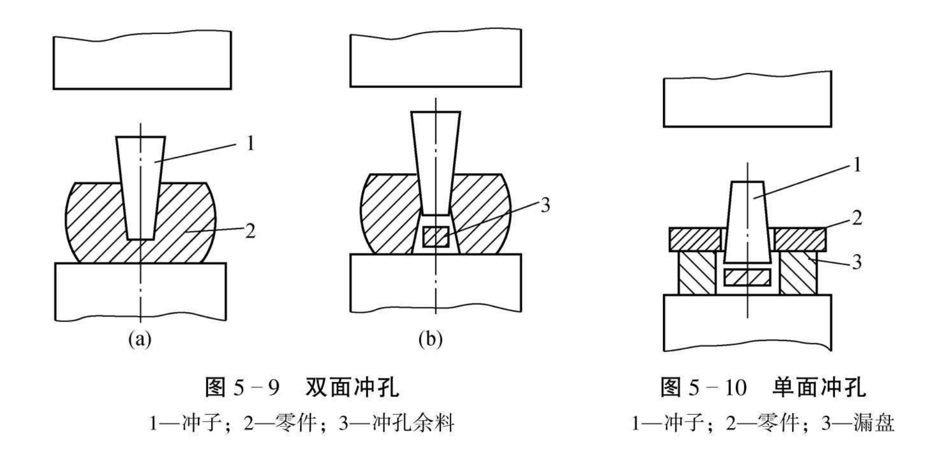


图 5－9　双面冲孔
1—冲子；2—零件；3—冲孔余料

图 5－10　单面冲孔
1—冲子；2—零件；3—漏盘

4. 弯曲

将坯料弯成一定角度或弧度的工序称为弯曲，如图 5－11 所示。

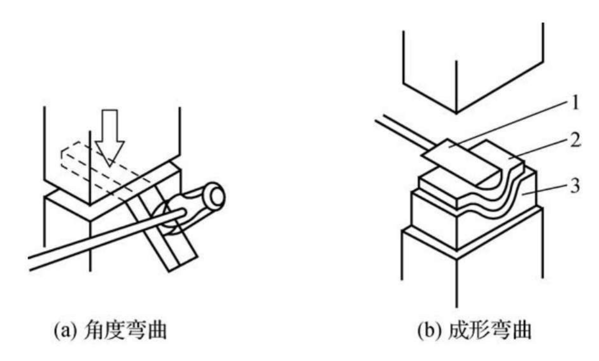


图 5－11　弯曲
1—成形压铁；2—零件；3—成形垫铁

5. 切割

将锻件从坯料上分割下来或切除锻件的工序称为切割，如图 5－12 所示。自由锻造的基本工序还有扭转、错移等。

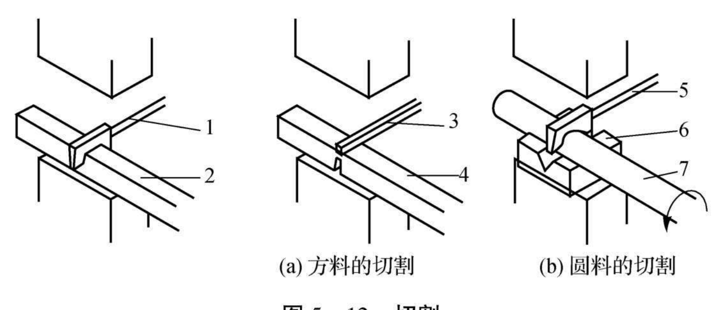


图 5－12　切割
1—垛刀；2、4、7—零件；3—剋棍；5—垛刀；6—垛垫

5.4.2 胚料的常见缺陷及分析

自由锻造过程中常见缺陷及产生原因的分析如表 5－6 所示，产生的缺陷有的是坯料质量不良引起的，尤其以铸锭为坯料的大型锻件更要注意铸锭有无表面或内部缺陷；有的是加热不当、锻造工艺不规范、锻后冷却和热处理不当引起的。对锻造缺陷，要根据不同情况下产生不同缺陷的特征进行综合分析，并采取相应的纠正措施。

表 5－6　自由锻件常见缺陷主要特征及产生原因

缺陷名称	主要特征	产生原因
表面横向裂纹	拔长时，锻件表面及角部出现横向裂纹	原材料质量不好；拔长时进锤量过大
表面纵向裂纹	镦粗时，锻件表面出现纵向裂纹	原材料质量不好；镦粗时压下量过大
中空纵裂	拔长时，中心出现较长甚至贯穿的纵向裂纹	未加热透，内部温度过低；拔长时，变形集中于上下表面，心部出现横向拉应力
弯曲、变形	锻造、热处理后弯曲与变形	锻造矫直不够；热处理操作不当
冷硬现象	锻造后锻件内部保留冷变形组织	变形温度偏低；变形速度过快；锻后冷却过快



5.5 模型锻造

模型锻造简称模锻，是在高强度模具材料上加工出与锻件形状一致的模膛（即制成锻模），加热后的坯料在模膛内受压变形，最终得到和模膛形状相符的锻件。模锻与自由锻相比有下列特点：①能锻出形状比较复杂的锻件；②模锻件尺寸精确、表面粗糙度小、加工余量小；③生产率较高；④模锻件节省金属材料、减少切削加工工时，因此在批量足够条件下可降低零件成本；⑤劳动条件得到一定改善。但是，模锻生产受到设备吨位的限制，模锻件的尺寸、重量不能太大。此外，锻模制造周期长、成本高，所以模锻适合中小型锻件的大批生产。按所用设备不同，模锻可分为锤上模锻、压力机模锻、液压机模锻等。

5.5.1 胎模锻

胎模锻是从自由锻变化到模锻的一种过渡方式，是在自由锻造设备上使用简单的模具（胎模）来生产模锻件。胎模锻一般采用自由锻方法制坯，在胎模中终锻成形。胎模不固定在设备上，锻造时根据工艺过程可随时放上或取下。胎模锻生产比较灵活，它适合于中小批量生产，在缺乏模锻设备的中小型工厂中应用较多。

六角螺栓的胎模锻过程如图 5－13 所示，齿轮坯的胎模锻过程如图 5－14 所示。

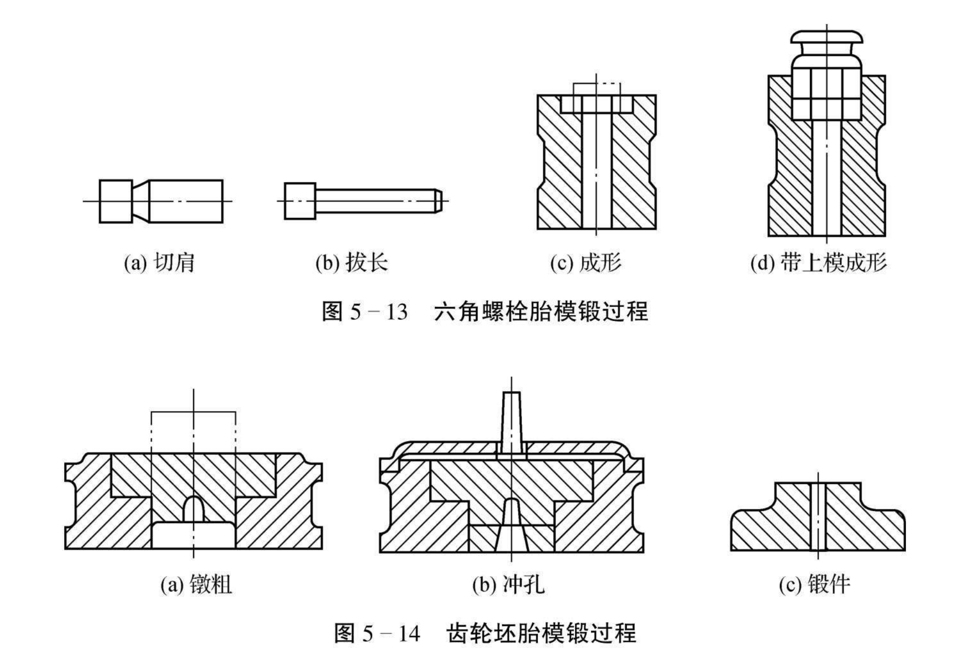


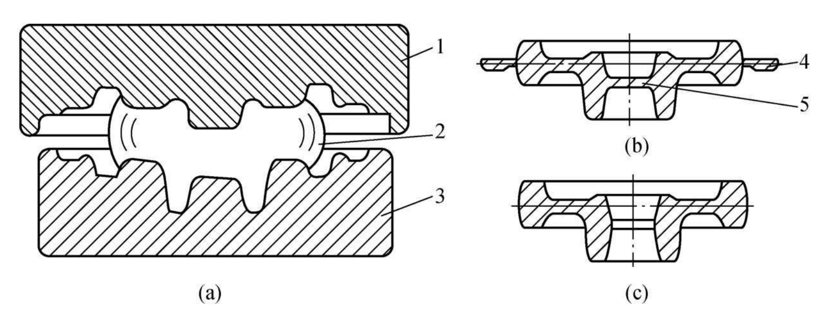
图 5 - 13　六角螺栓胎模锻过程

图 5 - 14　齿轮坯胎模锻过程

5.5.2　锤上模锻

通常锻模做成上模和下模，分别固定在设备的上下砧座上，锻模上有导柱导套或定位块保证上下模对准。只有一个模膛的锻模称单模膛锻模；制坯和终锻都在一副锻模的不同模膛内完成的称多模膛锻模。

通常模锻设备都配有吨位较小的压力机，以完成锻件的冲孔、切边和校正等工艺过程。模锻齿轮坯过程如图 5 - 15 所示。汽车摇臂模锻过程如图 5 - 16 所示。



（a）镦粗坯料成形　（b）脱模后锻件　（c）冲孔切边后锻件

图 5 - 15　齿轮坯模锻过程

1—上模；2—坯料；3—下模；4—飞边；5—冲孔连皮

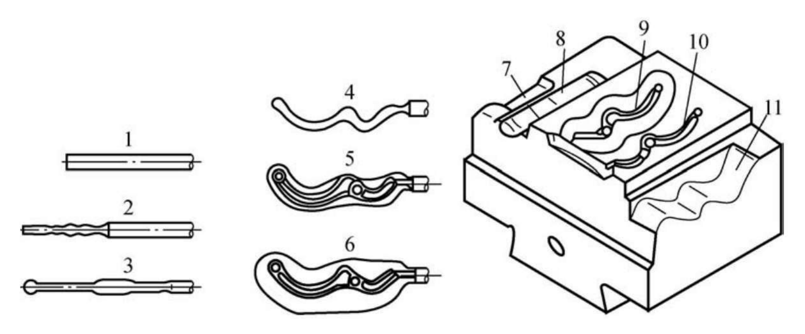


图 5－16　汽车摇臂模锻过程

1—坯料；2—拔长；3—滚压；4—弯曲；5—预锻；6—终锻；7—拔长模膛；8—滚压模膛；9—终锻模膛；10—预锻模膛；11—弯曲模膛



5.6　锻造技术训练实例

六角螺栓自由锻实例：如图 5－17 所示为六角螺栓零件锻件图，采用 100kg 空气锤自由锻造，六角螺栓毛坯的自由锻工艺过程如表 5－7 所示，其主要变形工序为局部镦粗和冲孔。

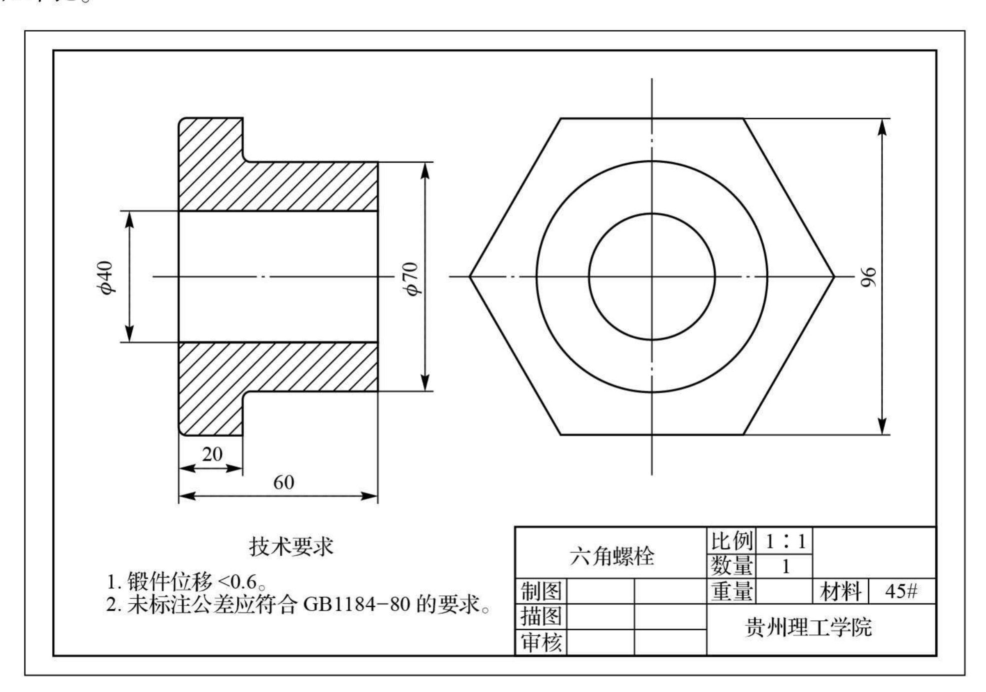


图 5－17　六角螺栓零件锻件图

表 5－7　六角螺栓毛坯的自由锻造工艺过程

序号	工序名称	工序简图	使用工具	操作方法
1	局部镦粗	φ70 20 40	镦粗漏盘 火钳	漏盘高度和内径尺寸要符合要求，局部镦粗高度为 20mm
2	修整		火钳	将镦粗造成的鼓形修平
3	冲孔	φ40	镦粗漏盘 冲子	冲孔时套上镦粗漏盘，以防径向尺寸涨大，采用双面冲孔法冲孔，冲孔时孔位要对正，并防止冲歪
4	锻六角		冲子 火钳 平锤	冲子操作：注意轻击，随时用样板测量
5	罩圆倒角		罩圆窝子	罩圆窝子要对正，轻击
6	精整	略		检查及精整各部分尺寸

思考题

1. 始锻温度和终锻温度过高或过低对锻件将会有什么影响？

2. 锻造生产与铸造相比有哪些主要的优缺点？举例说明它们的应用场合。

3. 回转成形方法各可用哪些传统的锻压方式生产？试另举几例可用回转成形方法生产的零件或毛坯。

4. 举例说明自由锻件和模锻件的应用范围。

第6章 焊　接

教学目的和要求： 通过本章的学习使学生了解气焊、气割、电弧焊等工艺过程的特点和应用，了解焊条、焊剂、焊丝等焊接材料的使用，熟悉常用焊接设备。配合实践教学，掌握焊条电弧焊、气焊和气割的基本操作知识。了解压力焊、钎焊、高能密束焊等方法。



6.1 焊接概述

6.1.1 焊接方法分类

焊接是通过加热或加压，或两者兼用，并且用或不用填充材料，使焊件金属达到原子结合的一种加工方法。

根据焊接的工艺特点和母材金属所处的状态，将焊接方法分为三大类：熔化焊、压力焊和钎焊。

熔化焊是将接头加热至熔化状态，不加压力的焊接方法；压力焊是对焊件施加压力，加热或不加热的焊接方法；钎焊是采用熔点比母材低的钎料，将焊件和钎料加热到高于钎料的熔点而母材不熔化，利用毛细管作用使液态钎料填充接头间隙与母材相互扩散连接焊件的焊接方法。

熔化焊、压力焊和钎焊三类方法，每一类依据工艺特点，又分成若干不同的方法，如表6－1所示。

表6－1　焊接方法分类

<table>
<tr><th>钎焊</th><th colspan="2">压力焊</th><th colspan="5">融化焊</th></tr>
<tr><td rowspan="2">烙帖钎焊
火焰钎焊
电阻钎焊
真空钎焊
超声波钎焊
盐浴钎焊</td><td rowspan="2">摩擦焊
气压焊
冷压焊
超声波焊
爆炸焊
扩散焊
高频焊</td><td>电阻焊</td><td rowspan="2">电子束焊
激光焊</td><td>气体保护焊</td><td rowspan="2">铝热焊
电渣焊
等离子弧焊</td><td>电弧焊</td><td rowspan="2">气焊</td></tr>
<tr><td>点焊
缝焊
对焊
凸焊</td><td>氩弧焊
CO_2 气体保焊</td><td>手工电弧焊
埋弧自动焊</td></tr>
</table>

6.1.2 焊接方法的特点及应用

当前世界上已大量应用焊接方法制造各种金属结构。焊接方法得到人们的重视并

获得迅速发展是因其具有以下优点。

1. 焊接可以较方便地将不同形状与厚度的型材连接起来；也可以将铸、锻件焊接起来；甚至能将不同种类的材料连接起来；从而使结构中不同种类和规格的材料应用得更合理；

2. 焊接连接刚度大、整体性好。同时，焊接容易保证气密性与水密性；

3. 焊接工艺一般不需要大型、贵重的设备，因而设备投资少、投产快，容易适应不同批量的结构生产，更换产品方便。此外，焊接参数的电信号易于控制，容易实现自动化。焊接机械手和机器人，已用于工业部门。在国外已有无人焊接自动化车间。

4. 焊接适宜于制造尺寸较大的产品和形状复杂及单件或小批量生产的结构，并可在一个结构中选用不同种类和价格的材料，以提高技术及经济效果。

但是，焊接也存在如下一些不足之处。

1. 常用的焊接方法将金属局部高温快速加热并快速冷却，结果导致焊缝及热影响区中的化学成分、金相组织、力学性能和物理性能、抗腐耐磨等性能与母材有所不同；

2. 焊件中存在焊接残余应力和变形，这不同程度地影响了产品的质量和安全性；

3. 焊缝及热影响区有时因工艺不当产生的某些缺陷，将会影响结构的承载能力。

实践证明，这些缺点的严重程度和危害性均与材料选用、设计、制造工艺水平等有关。合理选用材料，精心设计，合理的焊接工艺和严格的科学管理制度可以大大提高焊件的使用寿命。

焊接技术可用于制造金属结构，广泛用于造船、车辆、桥梁、航空航天、建筑钢结构、重型机械、化工装备等工业部门；可制造机器零件和毛坯，如轧辊、飞轮、大型齿轮、电站设备的重要部件等；可连接电气导线和精细的电子线路。凡是金属材料需要连接的地方，就有焊接方法的应用。它甚至还可应用于新型陶瓷连接、非晶态金属合金焊接等。



6.2　手工电弧焊

6.2.1　焊接电弧

焊接电弧发生在焊条端头与工件之间，是电场通过两电极（焊条与工件）之间的气体进行强力、持久的放电，即所谓气体放电现象。

电弧作为焊接能量的载体，有着复杂的电—热—力的能量转换过程。焊接过程中，电弧不仅是热源，同时也是力源。电弧力对焊缝成形和焊接过程稳定性有着重要影响，其中尤以对工件熔透深度、金属熔滴过渡等影响最为突出。

1. 焊接电弧的形成

焊接时，先将焊条与焊件瞬时接触，发生短路。强大的短路电流流经少数几个接触点，如图 6 - 1（a）所示，致使接触点处温度急剧升高并熔化，甚至部分发生蒸发。当焊条迅速提起时，焊条端头的温度已升得很高，在两电极间的电场作用下，产生了热电子发射。飞速的电子撞击焊条端头与焊件间的空气，使之电离成正离子和负离子。电子和负离子流向正极，正离子流向负极。这些带电质点的定向运动形成了焊接电弧，如图 6 - 1（b）所示。

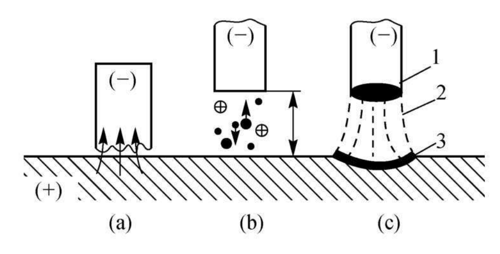


图 6-1　焊接电弧形成

1—阴极区；2—弧柱区；3—阳极区

2. 焊接电弧的构造、温度和极性

焊接电弧由阴极区、阳极区和弧柱区三部分组成，如图 6-1（c）所示，各部分的温度不同。

以铁为电极材料的电弧为例，阴极区温度约为 2400℃，阳极区温度约为 2600℃，而弧柱区温度高达 6000℃～8000℃。通常，在阳极材料和阴极材料相同情况下，阳极温度略高于阴极温度，而弧柱温度则随焊接电流增大而升高。

现仍对以铁为电极材料的电弧进行热量分析，阴极区因发射电子而消耗一定能量，故阴极区产生的热量略低，约占电弧热量的 36%；阳极区表面受高速电子的撞击，产生较大的能量，故发出较多的热量，约占电弧热量的 43%；弧柱区产生的热量仅占 21%；弧柱周围温度较低，故大部分热量散失在大气中。

由于电弧中各区温度不同，因此，用直流电源焊接时有正接法和反接法的区分，工件接电焊机的正极，焊条接电焊机的负极的接法，称为正接法；反之，则为反接法。焊接薄板时，采用直流反接可防止烧穿。正常焊接时，为获得较大的熔深，则用正接法。堆焊金属时，采用反接，目的是增加焊条的熔化速度，减少母材的熔深，降低母材对堆焊层的稀释。对碱性焊条，用直流电源可使电弧稳定。使用交流电焊接时，由于电源周期性地改变极性，故无正接或反接的区分。焊条和工件上的温度及热量分布趋于一致。

3. 焊接电弧的静特性

焊接电弧是焊接回路中的负载，它起着把电能转变为热能的作用，在这一点上它与普通的电阻有相似之处，但它与普通电阻又有明显的区别。普通电阻通以电流时，电阻两端的电压降与通过的电流值成正比，如见图 6-2 所示，而焊接时，电弧两端的电压降与通过电弧的电流并不成正比。焊接电弧的这一特性，即在电弧长度一定时，电弧两端的电压与焊接电流之间的关系，如图 6-2 所示，称焊接电弧的静特性。在电流较小时，电弧电压较高。较高的电压才能维持必需的电离程度。电流增大使电弧温度升高，气体电离和阴极发射电子增强，所以维持电弧所需的电弧电压就降低。在正常规范焊接时，电弧电压与焊接电流大小无关，曲线呈平特性。如弧长增高，则所需的电弧电压相应增加。

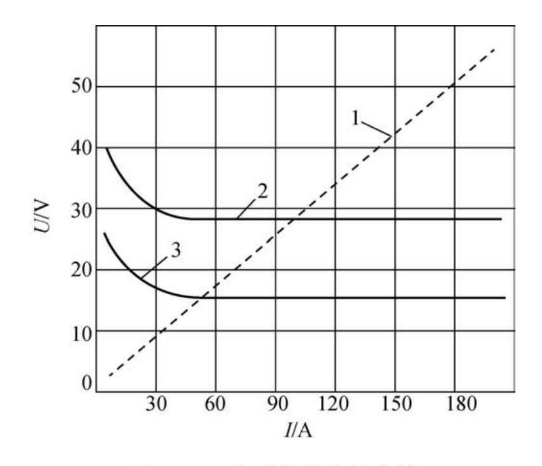


图 6－2　电弧的静特性曲线

1—普通电阻特性；2—弧长为 5mm 的电弧静特性；3—弧长为 2mm 的电弧静特性

6.2.2　电焊条

电焊条由金属焊芯和药皮组成，如图 6－3 所示。在焊条药皮前端有 45°的倒角，便于引弧。焊条尾部的裸焊芯，便于焊钳夹持和导电。焊条直径（即焊芯直径）通常有 2、2.5、3.2、4、5、6mm 等规格。其长度 L 一般为 300~450mm。目前因装潢、薄板焊接等需要，手提式轻小型电焊机在市场上问世，与之相配，出现直径 0.8mm 和 1mm 的特细电焊条。

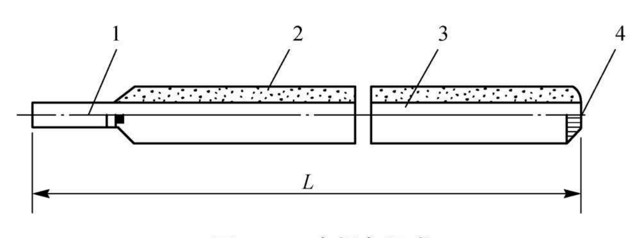


图 6－3　电焊条组成

1—夹持端；2—药皮；3—焊芯；4—引弧端

1. 焊芯

焊芯主要起传导电流和填充焊缝的作用，同时可渗入合金。焊芯由特殊冶炼的焊条钢拉拔制成，与普通钢材的主要区别在于控制硫、磷等杂质含量和严格限制含碳量。焊芯牌号含义：H 为焊字汉语拼音首字母，其后的数字表示含碳量，其他合金元素的表示方法与钢号表示相同，如 H08、H08A、H08SiMn 等。

2. 药皮

焊芯表面药皮的作用是使焊接过程顺利进行并使焊接接头获得优良的力学性能和合金成分。药皮由多种矿物质、有机物、铁合金等粉末用黏结剂调和制成，压涂在焊芯上，主要起造气、造渣、稳弧、脱氧和渗合金等作用。

3. 电焊条的分类、型号及牌号

电焊条品种繁多，我国现行的焊条主要根据其用途进行分类。原机械工业部《焊接材料产品样本》中将焊条按用途分为十大类型，如表 6－2 所示。新国标则按用途分为七大类型，将原结构钢焊条分为碳钢焊条和低合金钢焊条。其七大类型是：碳钢焊条、低合金钢焊条、不锈钢焊条、堆焊焊条、铸铁焊条及焊丝、铜及铜合金焊条和铝及铝合金焊条。

表 6－2　电焊条的分类

焊条类型	牌号符号	焊条类型	牌号符号
结构钢焊条	J（结）	铸铁焊条	Z（铸）
耐热钢焊条	R（热）	镍及镍合金焊条	Ni（镍）
低温钢焊条	W（温）	铜及铜合金焊条	T（铜）
不锈钢焊条	G（铬）	铝及铝合金焊条	L（铝）
	A（奥）	特殊用途焊条	TS（特）
堆焊焊条	D（堆）		

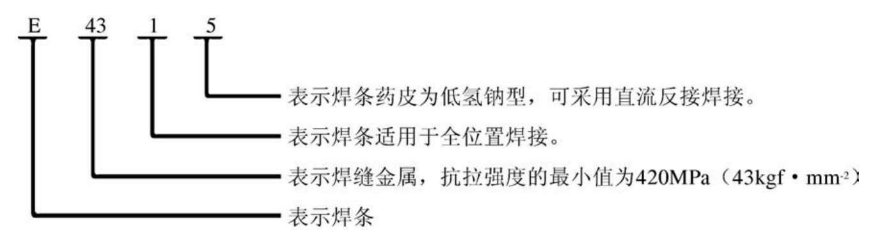
为了满足各类焊条的焊接工艺及冶金性能要求，焊条的药皮类型分为十大类，如表 6－3 所示。

表 6－3　焊条药皮类型及适用电源

牌号	药皮	熔渣特性	适合电源
XX0	不规定	－	－
XX1	氧化钛型	酸性	交流，直流
XX2	钛钙型	酸性	交流，直流
XX3	钛铁矿型	酸性	交流，直流
XX4	氧化铁型	酸性	交流，直流
XX5	纤维素型	酸性	交流，直流
XX6	低氢钾型	碱性	交流，直流
XX7	低氢钠型	碱性	直流
XX8	石墨型	铸铁及堆焊焊条用交、直流电源	
XX9	盐基型	铝及铝合金焊条用直流	

在同一类型的焊条中，根据不同特性有不同的型号。焊条的型号能反映焊条的主要特性。以碳钢焊条为例，碳钢焊条型号根据熔敷金属的抗拉强度、药皮类型、焊接位置和焊接电流种类划分。具体型号编制方法是：字母 E 表示焊条；E 后两位数字表示焊缝金属抗拉强度的最小值，单位 kgf/mm^2（1kgf/mm^2 = 9.81MPa）；第三位数字表示焊条的焊接位置；第三位和第四位数字组合时，表示焊接电流种类及药皮类型。

举例如下：



其他类型焊条的型号可参阅有关焊接手册。

考虑到国内各行业对原来的焊条牌号印象较深，故在《焊接材料产品样本》（1987年）中仍保留了原牌号的名称。电焊条牌号共分十大类，见表6－2。每类电焊条的第一个大写特征字母表示该焊条类别，例如J（或结）代表结构焊条，A代表奥氏体铬镍不锈钢焊条等。特征字母后面有三位数字，其中前两位数字在不同类别焊条中的含义不同；第三位数字所代表的含义都一样，均表示焊条药皮类型和焊接电流要求，见表6－3。例如，焊条牌J42（或结422）表示结构刚焊条，其焊缝金属抗拉强度不小于412MPa（即$42kgf/mm^2$），最后的数字2代表焊条的药皮类型为钛钙型，交流直流电源均可用。

结构钢焊条包括碳钢、低合金钢和耐大气、海水腐蚀钢焊条等等。

某些牌号的碳钢焊条举例如表6－4所示。

表6－4　某些牌号的碳钢焊条举例

牌号	型号	药皮类型	焊接位置	电流	主要用途
J422	E4303	钛钙型	全位置	A. C，D. C	焊接较重要的低碳钢结构和同强度等级的低合金钢
J422GM	E4303	钛钙型	全位置	A. C，D. C	焊接海上平台、船舶、车辆、工程机械等表面装饰焊缝
J426	E4316	低氢钾型	全位置	A. C，D. C	焊接重要的低碳钢及某些低合金钢结构
J427	E4315	低氢钠型	全位置	D. C	
J502	E5003	钛钙型	全位置	A. C，D. C	焊接16Mn及相同强度等级低合金钢的一般结构
J502Fe	E5014	铁粉钛钙型	全位置	A. C，D. C	
J506	E5016	低氢钾型	全位置	A. C，D. C	焊接中碳钢及某些重要的低合金钢（如16Mn）结构
J507	E5015	低氢钠型	全位置	D. C	焊接中碳钢及16Mn等低合金钢重要结构
J507R	E5015-G	低氢钠型	全位置	D. C	焊接压力容器

4. 酸性焊条与碱性焊条

根据焊条药皮焊后溶渣中所含酸性氧化物与碱性氧化物的数量不同（见表6－3），焊条分为酸性焊条和碱性焊条。如酸性氧化物大于碱性氧化物的焊条则为酸性焊条；反之为碱性焊条。碱性焊条适宜焊接高强度等级的重要结构，但萤石会使电弧不稳定，并产生有毒气体（氟）。此外碱性焊条熔渣的脱渣性差、焊缝成形美观不如酸性。

6.2.3 电焊机

1. 手工电弧焊对电源的要求

手工电弧焊的电源设备简称电焊机。为了使焊接顺利进行，电焊机在性能上应满足以下几点要求。

（1）具有陡降的特性。一般用电设备都要求电源电压不随负载变化而变化，要求近似水平的特性，如图 6-4 所示。但焊接电源则要求其电压随负载增大而迅速降低，这样才能满足下列的焊接要求。

1）具有一定的空载电压以满足引弧需要；

2）限制适当的短路电流，以保证焊接过程频繁短路时，电流不致无限增大而烧毁电源；

3）电弧长度发生变化时，能保证电弧的稳定。

（2）焊接电流具有调节特性，以适应不同材料和板厚的焊接要求。

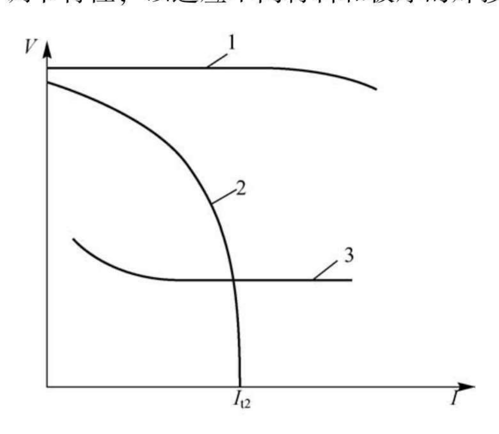


图 6-4 焊接电源特性

1—普通电源的特性曲线；2—焊接电源的特性曲线；3—焊接电弧的静特性曲线

2. 常用的交流和直流电焊机

电焊机有交流弧焊机和直流弧焊机两类。

（1）交流弧焊机。交流弧焊机又称弧焊变压器，也即交流弧焊电源，用以将电网的交流电变成适宜于弧焊的交流电。常见的型号有：BX1-400、BX3-500 等。其中 B 表示弧焊变压器，X 为下降特性电源，1 为动铁芯式，3 为动线圈式，400、500 为额定电流的安培数。

（2）直流弧焊机。直流弧焊机有两种：发电机式直流弧焊机和整流器式直流弧焊机（又称弧焊整流器）。

1）发电机式直流弧焊机因结构复杂、价格高、噪声大等原因，我国早在 20 世纪 90 年代初就明文规定不准生产和使用。

2）整流器式直流弧焊机是一种优良的电弧焊电源，现被大量使用。它由大功率整流元件组成整流器，将电流由交流变为直流，供焊接使用。整流器式直流弧焊机的型号含义：如 ZXG-500，其中，Z 为整流弧焊电源，X 为下降特性电源，G 为硅整流式，500 为额定电流的安培数。

近年来，逆变式电焊机作为新一代的弧焊电源，其特点是直流输出，具有电流波动小、电弧稳定、焊机重量轻、体积小、能耗低等优点，得到了越来越广泛的应用。例如，ZX7-315、ZX7-160 等，其中 7 为逆变式，315、160 为额定电流安培数。

6.2.4　手工电弧焊工艺

1. 接头型式和坡口型式

在手工电弧焊中，由于焊件厚度、结构形状和使用条件不同，其接头型式和坡口型式也不同，如图 6－5 所示。根据 GB985-88，焊接接头型式可分为对接接头，角接接头、T 形接头和搭接接头四种。

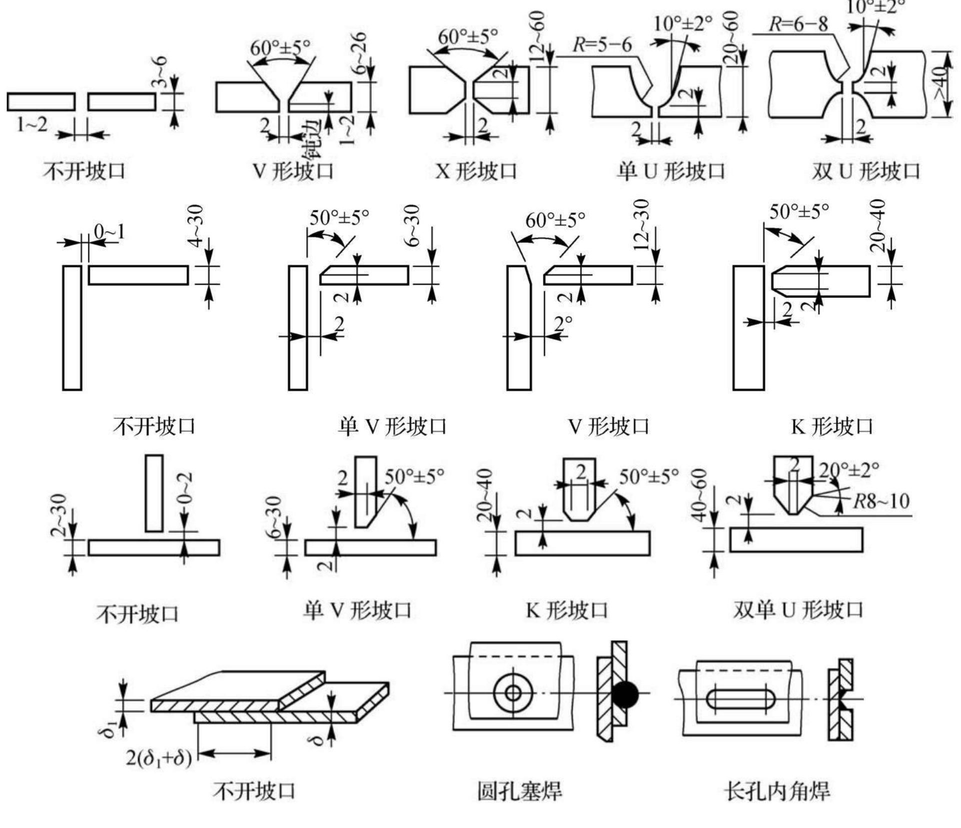
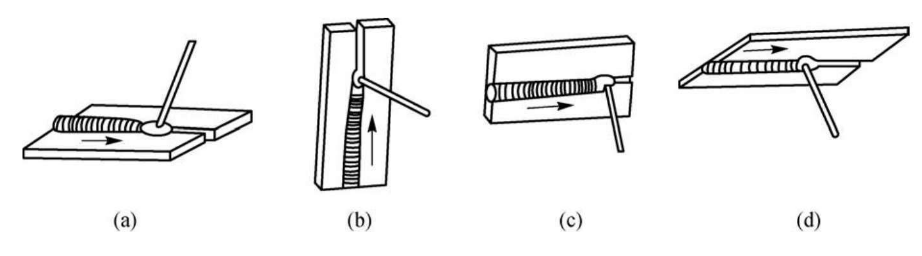


图 6－5　焊接接头型式和坡口型式

（a）对接接头；（b）角接接头；（c）T 形接头；（d）搭接接头

（1）为了使焊件焊透并减少被焊金属在焊缝中所占的比例，一般在对接接头手工电弧焊钢板厚度大于 6mm 时要开坡口。重要的结构厚度大于 3mm 时就要开坡口。常见的坡口型式有 V 形、U 形、K 形和 X 形等。

（2）焊缝的空间位置按施焊时焊缝在空间所处的位置不同，焊缝可分为平焊缝、立焊缝、横焊缝和仰焊缝四种型式，如图 6－6 所示。平焊时，熔化金属不会外流，飞溅小，操作方便，易于保证焊接质量；横焊和立焊则较难操作；仰焊最难，不易掌握。



（a）平焊缝；（b）立焊缝；（c）横焊缝；（d）仰焊缝

图 6－6　焊缝的空间位置

（3）焊接规范参数的选择

手工电弧焊焊接规范参数包括焊条直径、焊接电流、电弧电压和焊接速度等，而主要的参数通常是焊条直径和焊接电流。至于电弧电压和焊接速度在手工电弧焊中除非特别指明均由焊工视具体情况掌握。

1）焊条直径的选择　焊条直径主要取决于焊件厚度、接头型式和焊缝位置、焊接层数等因素。若焊件较厚，则应选用较大直径的焊条。平焊时允许使用较大的电流进行焊接，焊条直径可大些，而立焊、横焊与仰焊应选用小直径焊条。多层焊的打底焊，为防止未焊透缺陷，选用小直径焊条；大直径焊条用于填坡口的盖面焊道。

2）焊接电流　焊接电流主要根据焊条类型、焊条直径、焊件厚度、接头型式、焊缝位置及焊道层次等因素确定。

使用结构钢焊条进行平焊时，焊接电流可根据经验公式：$I=Kd$ 选用。

式中，I—焊接电流（A）；

d—焊条直径（mm）；

K—经验系数（A/mm）。

K 和 d 的关系为：d 在 1～2mm 时，K 为 25～30A/mm；d 在 2～4mm 时，K 为 30～40A/mm；d 在 4～6mm 时，K 为 40～60A/mm。

立焊、横焊和仰焊时，焊接电流应比平焊时小 10%～20%，对合金钢和不锈钢焊条，由于焊芯电阻大，热膨胀系数高，若电流过大，则焊接过程中焊条容易发红而造成药皮脱落，因此焊接电流应适当减少。

3）焊接层数选择　中厚板开坡口后，应采用多层焊。焊接层数应以每层厚度小于 4～5mm 的原则确定。当每层厚度为焊条直径的 0.8～1.2 倍时，生产率较高。



6.3　其他焊接方法简介

6.3.1　埋弧自动焊

埋弧自动焊（简称埋弧焊）是电弧在焊剂层下燃烧，用机械自动引燃电弧并进行控制，自动完成焊丝送进和电弧移动的一种电弧焊方法。埋弧自动焊焊缝形成过程如图 6－7 所示。

和手工电弧焊相比，埋弧自动焊以焊丝代替焊条并可连续送进；以颗粒状焊剂代替焊条药皮，但其中无造气剂而只是靠固态的焊剂及焊接中形成的熔渣对熔池进行保护。

埋弧自动焊机由焊接电源、控制箱和焊接小车三部分组成。焊机有多种型号，MZ—1000 型是应用最广的一种。型号中的 M 表示埋弧焊机，Z 表示自动焊机，1000 表示额定焊接电流为 1000 安培。

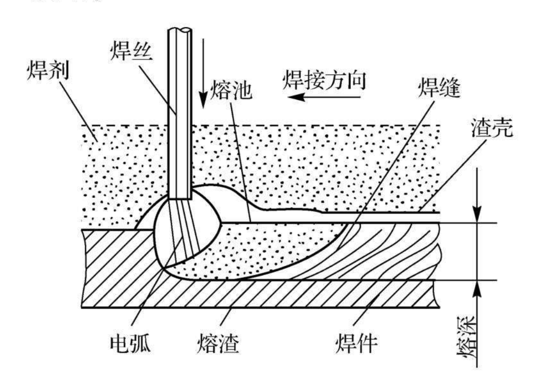


图 6－7　埋弧自动焊焊缝形成过程

和手工电弧焊相比，埋弧自动焊有以下特点。

1. 焊接质量好。由于电弧和金属熔池得到可靠保护，焊接过程稳定，焊接规范自动调节，所以焊接质量十分稳定，焊缝成形及力学性能优良。

2. 生产率高。因埋弧焊使用光焊丝，不存在手弧焊的焊条发热问题，以及焊丝导电长度短，所以可使用大电流（可达 1000A 以上）焊接，又因其熔深大，所以中厚板焊接可以不开或少开坡口，故生产率高不说，还大量节省了开坡口工时及填充焊接材料与能耗。

3. 劳动条件好。电弧光在焊剂层下不外露，焊接过程机械化、自动化，劳动条件大为改善。

4. 设备复杂，适应性较差。只适于平焊位置的对接或角接平直长焊缝，或直径较大的环缝。

埋弧自动焊适于中厚板（8～60mm）的焊接，可以焊接低碳钢、低合金结构钢、不锈钢、耐热钢和紫铜等。广泛应用于容器、锅炉、造船及各种中、大型钢结构（如起重机、桥梁等）的制造中。

6. 3. 2　气体保护焊

使用焊丝作为电极和填充材料，用外加气体作为电弧介质及保护气体并由该气体对电弧及熔池进行保护的电弧焊称为气体保护焊。常用的保护气体有氩气、二氧化碳气等。

1. CO_2 气体保护焊

CO_2 气体保护焊（简称 CO_2 焊）是一种熔化极焊，它采用 CO2 气体进行保护。其焊接设备与器材如图 6－8 所示。CO2 焊成本低（仅为手弧焊及埋弧焊 40%～50%）；生产率高（比手弧焊高 1～4 倍）；变形较小，抗裂性好，操作灵活，可全位置焊接。CO_2 焊可用于低碳钢、低合金结构钢的焊接，广泛用于各类钢结构的制造。由于 CO_2 气体有一定的氧化性，焊接时会造成合金元素烧损，所以它不适用于有色金属和高合金钢的焊接。CO_2 焊飞溅较大，焊缝成形稍差。

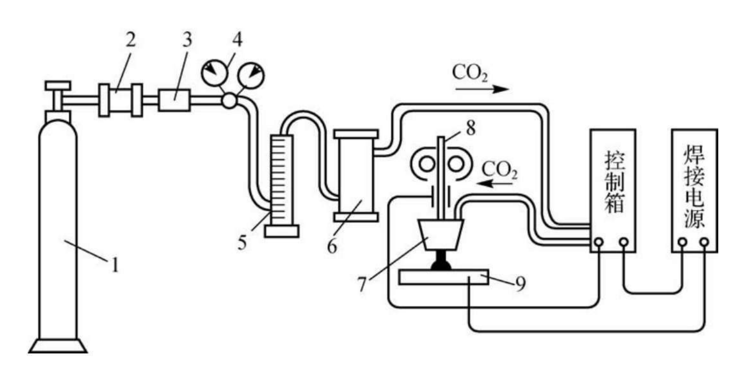


图 6－8　CO2 气体保护焊设备示意图

1—气瓶；2—预热器；3—高压干燥器；4—减压表；5—流量计；6—低压干燥器；7—喷嘴；8—焊丝；9—焊件

2. 氩弧焊

氩弧焊氩弧焊是用氩气作保护气体的电弧焊。焊接时氩气由喷嘴连续喷出，有效地保护电弧和熔池。由于氩气是惰性气体，在焊接中与液态金属既不发生冶金、化学反应，也不溶入金属，所以电弧稳定，焊接质量高。另外，由于气流压缩使电弧热量集中，因而焊接速度快，熔深大，而焊接变形小。由于上述特点，氩弧焊一般用于有色金属（如铜、铝、钛及其合金）和不锈钢、耐热钢、高强度结构钢的焊接。因氩气较贵，所以氩弧焊主要用于重要结构的焊接。

氩弧焊按电极不同，分为钨极氩弧焊和熔化极氩弧焊，如 6－9 所示。

钨极氩弧焊用钨棒作电极。焊接时，钨极与工件间产生电弧且钨极不熔化，所以须另加焊丝作为填充金属。它适于焊接 6mm 以下的薄板及管子或作为中厚板焊接（用其他焊接方法）时的打底焊。熔化极氩弧焊用焊丝作电极兼作填充金属。这种方法生产率高，适于中厚板的焊接。

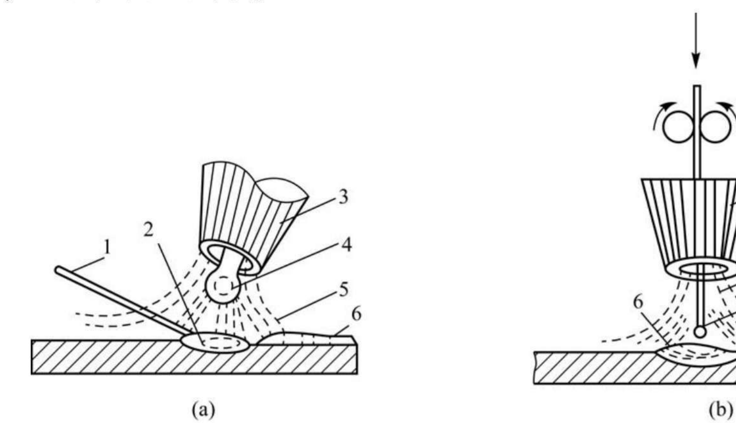


图 6－9　氩弧焊示意图

a）钨极氩弧焊：1—焊丝；2—熔池；3—喷嘴；4—钨极；5—气体；6—焊缝

b）熔化极氩弧焊：1—滚轮；2—喷嘴；3—气体；4—焊丝；5—焊缝；6—熔池

6.3.3　激光焊

激光焊是利用大功率相干单色光子流聚集而成的激光束为热源进行焊接的方法。激光的产生是利用了原子受激辐射的原理，当粒子（原子、分子等）吸收外来能量时，从低能级跃升至高能级，此时若受到外来一定频率的光子的激励，又跃迁到相应的低能级，同时发出一个和外来光子完全相同的光子。如果利用装置（激光器）使这种受激辐射产生的光子去激励其他粒子，将导致光放大作用，产生更多的光子，在聚光器的作用下，最终形成一束单色的、方向一致和亮度极高的激光输出。再通过光学聚焦系统，可以使焦点上的激光能量密度达到 106 W/cm2～1012 W/cm2，然后以此激光用于焊接。激光焊接装置如图 6－10 所示。

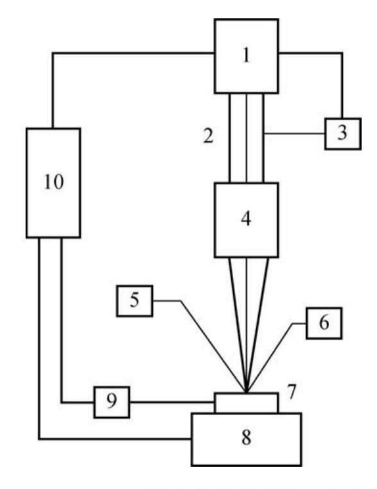


图 6－10　激光焊接装置示意图

1—激光发生器；2—激光光束；3—信号器；4—光学系统；5—观测瞄准系统 6—辅助能源；7—焊件；8—工作台；9—控制系统；10—控制系统

激光焊和电子束焊同属高能密束焊范畴，与一般焊接方法相比有以下优点。

（1）激光功率密度高，加热范围小（<1 mm），焊接速度高，焊接应力和变形小。

（2）可以焊接一般焊接方法难以焊接的材料，实现异种金属的焊接，甚至用于一些非金属材料的焊接。

（3）激光可以通过光学系统在空间传播相当长距离而衰减很小，能进行远距离施焊或对难接近部位焊接。

（4）相对电子束焊而言，激光焊不需要真空室，激光不受电磁场的影响。

激光焊的缺点是焊机价格较贵，激光的电光转换效率低，焊前零件加工和装配要求高，焊接厚度比电子束焊低。

激光焊应用在很多机械加工作业中，如电子器件的壳体和管线的焊接、仪器仪表零件的连接、金属薄板对接、集成电路中的金属箔焊接等。

6.3.4　钎焊

钎焊是用熔点低于母材的金属材料作钎料，将焊件和钎料加热到适当的温度，使焊件仍处于固态而钎料熔化后靠湿润及毛细管作用填充进接头间隙并与母材相互扩散实现连接的一种方法。

按钎料熔点，钎焊分为软钎焊和硬钎焊两类。

1. 软钎焊

软钎焊钎料熔点低于450℃，接头强度低（<70MPa），常用于受力不大或工作温度较低的工件焊接，如用锡作钎料焊接的锡焊广泛用于仪表、电子线路等的焊接。

2. 硬钎焊

硬钎焊钎料熔点高于450℃，接头强度较高（可达200—500Mpa），适用于受力较大、工作温度较高的钢、铜、铝合金的机械零部件焊接。

钎焊时，一般要使用焊剂，其作用是清除钎料及母材表面的氧化物并改善钎料润湿性，如硬钎焊时用硼砂，软钎焊时用松香、氯化锌溶液等。

钎焊按加热方式不同分为烙铁钎焊、火焰钎焊、电阻钎焊、感应钎焊及炉中钎焊等。

钎焊因加热温度低，所以，接头处金属的组织和性能变化很小，焊件的应力和变形也小，工件尺寸形状容易保证。钎焊可以连接同种或异种金属，且生产率高，如碳钢、低合金钢、有色金属（如紫铜、青铜、黄铜、钛及钛合金）、碳素工具钢、高速钢、不锈钢、硬质合金等。

钎焊广泛应用于仪器、仪表及电子、航空、航天、机电制造业等。



6.4 焊接技术训练实例

焊接技术训练拟利用角钢和圆钢利用手工电弧焊焊接鞋架，设计图如图6－11所

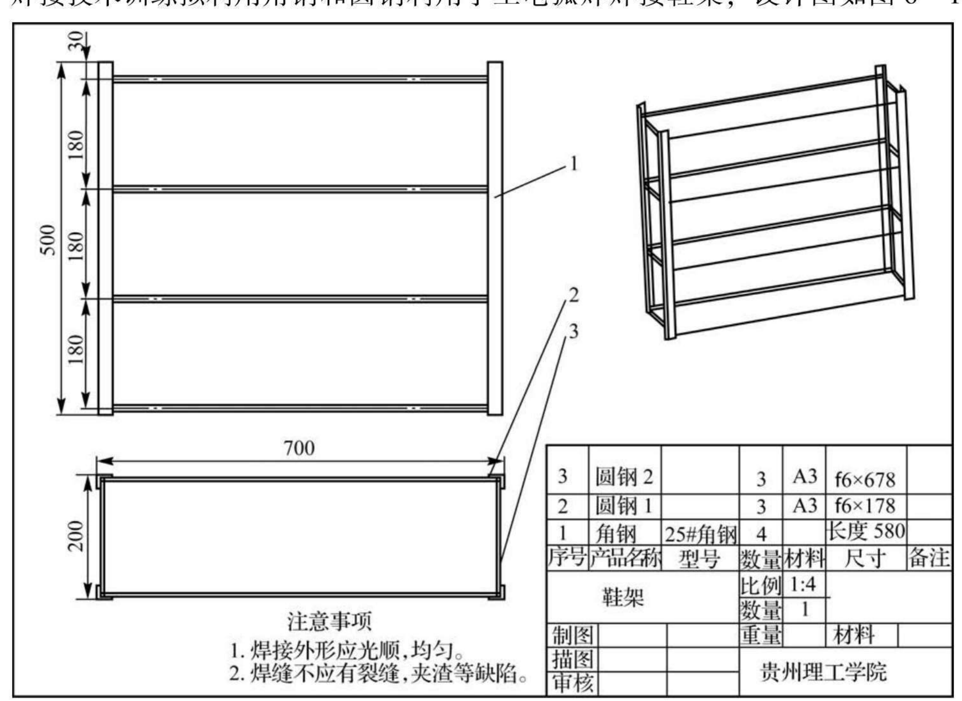


图6－11　鞋架示意图

示，工序步骤如表6－5所示。

表6－5　鞋架焊接过程及步骤

操作序号	加工简图	加工内容	工具、量具
1. 切割角钢和圆钢	略	按装配图要求切割鞋架所需的所有角钢和圆钢	砂轮切割机
2. 去毛刺	略	把切割好的角钢和圆钢边缘的毛刺去除	手持式打磨机、锉刀
3. 作焊接位置标记	略	按照装配图尺寸要求在四支角钢相应位置做上标记	画针
4. 焊接鞋架左侧面		按装配图要求用夹具固定两块角钢的位置，将四支圆钢3顺序焊接在两块角钢上	焊机、夹具
5. 焊接鞋架右侧面		按装配图要求用夹具固定两块角钢的位置，将四支圆钢3顺序焊接在两块角钢上	焊机、夹具
6. 焊接鞋架整体		用夹具固定鞋架左侧面和右侧面，将八支圆钢2顺序焊接在鞋架左侧面和右侧面上	焊机、夹具
7. 清理焊渣	略	清除鞋架焊缝上的焊渣	清渣锤

思考题

1. 钎剂和钎料的作用是什么？
2. 焊接有何特点？
3. 简述药皮和焊芯的作用？
4. 气割金属必须满足的条件是什么？



第 7 章　快速成型与逆向工程

教学目的和要求：快速成型与逆向工程技术是现代制造技术的重要分支。快速成型与逆向工程技术主要利用 3D 打印技术、激光扫描技术、CAD/CAM 技术等现代制造技术，实现产品的快速扫描、快速建模和快速制造，以满足瞬息万变的市场对制造领域的快速响应需求。本章分两节分别讲述快速成型与逆向工程技术的原理和实际应用，采用理论加实际的教学方法，使学生了解快速成型技术和逆向工程技术的原理、分类、发展及应用领域，并掌握 UP！3DP 型 3D 打印机和 3D CaMega 型三维扫描仪的基本使用方法。



7.1　快速成型与逆向工程概述

快速成型技术和逆向工程技术是近年来机械制造领域较为新兴的技术分支，两者均源于为了快速适应市场需求而对传统机械设计、机械加工过程的革新。快速成型技术，是指不需要使用刀具、模具、工装，而是由 CAD 模型直接驱动的快速制造复杂形状三维物理实体的技术总称。逆向工程技术，则是通过测量、设计分析等一系列手段对目标产品进行研究，从而推导出该产品的结构、尺寸、公差、工艺流程、强度性能等设计指标，并指导新产品设计的过程。

在实际生产中，往往将逆向工程技术与快速成型技术结合起来，实现对产品的快速扫描、快速建模、快速制造。由于消费市场对产品的需求瞬息万变，而工业产品的复杂程度也在逐渐提升，如果采用传统的正向开发、小批量试制模式对新产品进行开发，存在开发时间长、投入高、风险大等难题。因此，在开发阶段使用逆向工程技术快速借鉴市场现有产品的设计，同时利用快速成型技术将改善设计后的产品快速制造出来，可以极大缩短产品开发流程、降低产品原型制作成本。



7.2　快速成型技术

7.2.1　快速成型（Rapid Prototyping）技术原理、发展历程

相比于传统的机械制造成型方式，快速成型技术的制造流程为：①使用 CAD 软件制作出零件的三维模型；②对数字模型进行分层后得到各层截面的轮廓信息；③使用相应的软件将截面轮廓信息转化为零件加工路径；④根据成型工艺的不同，由控制系

统根据加工路径对各截面逐层制造，各截面叠加起来组成所需的零件毛坯；⑤对零件毛坯进行打磨、上色等后处理，形成最终的零件。

由于直接使用CAD模型进行制造而不需要制作模具、工装，因此零件的制作时间得到了很大程度的压缩，可以在几天甚至几小时内完成从设计到产品原型的转化，尤其适合于工业产品原型的制作。正是因为快速成型技术具有的这些优势，其在诞生初期就受到广泛关注，目前快速成型技术已被工业界广泛应用于产品概念原型设计、原理验证、原型机制造等领域。

快速成型技术的发展历史并不长，但发展非常迅速。20世纪80年代，1988年第一台商品化的快速成型设备面市。短短几年内，快速成型技术迅猛发展，多种快速成型系统相继问世。在1994年，全球销售的快速成型设备仅几千台，而到2015年，据统计全球全年的销量可达20万台以上。

与传统材料加工技术相比，快速成型技术具有以下的优势。

1. 成型快速。快速成型技术不依赖模具、刀具、卡具等，而是直接使用CAD模型即可生成产品。对零件的修改同样可以直接通过修改CAD模型实现，其设计和改型都非常方便快速，一般而言，仅需花费几个小时到几十个小时就可实现零件的设计、制造、修改过程；

2. 可成型复杂零件。相比于车、铣等工艺，快速成型技术采用离散/堆积成型的增材原理，特别适合于成型具有复杂型腔、复杂内部结构的零件；

3. 高生产柔性。快速成型技术由于在成型过程中无须任何专用夹具或工具，因此设备适应性强，生产不同零件时不需要进行长时间的准备工作，而是直接调用不同的CAD模型即可。

4. 兼容程度高。目前大部分快速成型系统均可兼容常见的CAD文件格式，因此快速成型技术可以方便的与其他使用通用格式CAD模型的技术进行兼容。例如逆向工程（Reverse Engineering）技术、CAD/CAE/CAM技术、网络技术、虚拟现实等，他们之间的结合可以组成功能更加强大的制造系统。

随着计算机技术、软件技术、数控技术、激光成型技术及新材料、新工艺的发展，快速成型技术未来还会有进一步完善，其发展趋势有以下几个方向：

1. 制造精度进一步提高。通过使用更先进的成型原理和更精密的设备分辨率更高，可制作传统工艺无法制作的复杂、精密产品，如照相机、磁头等，可制作的最小尺寸<0.5mm；

2. 成型材料更加丰富多样。目前常用的快速成型系统多使用塑料和金属作为成型材料，但已出现使用生物材料、陶瓷材料、食品材料等的快速成型系统。可预见未来快速成型系统使用的材料会更加丰富多样；

3. 系统兼容性更强。快速成型技术与逆向工程技术、虚拟现实技术、网络大数据技术等新技术的结合，将会催生出新一代的制造技术；

4. 成本进一步降低。由于市场规模的不断扩大，目前快速成型系统的成本相比于刚推出时已经有了大幅缩减，例如桌面级3D打印机的成本甚至不到千元人民币，可以预见未来快速成型系统的成本还会进一步降低；

5. 自动化/网络化程度进一步提高。互联网的发展催生了制造业的转型，而快速成型技术由于其技术的特殊性非常适合互联网时代下的制造。基于大数据、“互联网+”概念的快速成型系统是未来的发展热点；

6. 针对个人用户的快速成型系统成为新的发展热点。随着快速成型系统成本的降

低，其普及程度逐渐提高。目前针对个人用户的桌面级 3D 打印机已成为销量最大、普及率最广的快速成型系统，未来家庭工厂、创客空间等新型制造模式使得个人快速成型系统的发展方兴未艾。

7.2.2 快速成型工艺过程、特点

典型的快速成型工艺过程由以下几步组成：

1. 构建三维 CAD 模型。三维 CAD 模型是 RP 系统成型的基础，因此在开始成型前首先要根据设计需求构建所加工工件的三维 CAD 模型。三维 CAD 模型可以采用正向设计的方式，利用计算机辅助设计软件（如 Pro/E、I-DEAS、Solid Works、UG 等）进行正向设计；也可以采用逆向设计的方式，对已有的产品实体使用逆向工程技术进行扫描，得到产品的点云数据后利用相应的反求软件的方法来构造三维模型。

2. 三维模型的近似处理。采用计算机辅助设计软件设计的 CAD 模型往往有一些不规则的自由曲面，因此不能直接用于 RP 系统，而是要在加工前对模型进行近似处理。一般采用 STL 格式来对 CAD 模型进行近似处理。STL 格式采用一系列的小三角形平面来逼近原来的模型，每个小三角形用 3 个顶点坐标和一个法向量来描述，三角形的大小可以根据精度要求进行选择。典型的 CAD 软件都带有转换和输出 STL 格式文件的功能。

3. 三维模型的切片处理。根据被加工模型的特征选择合适的加工方向，在成型高度方向上用一系列一定间隔的平面切割近似后的模型，以便提取截面的轮廓信息。间隔一般取 0.05mm~0.5mm。间隔越小，成型精度越高，但成型时间也越长，效率就越低，反之则精度低，但效率高。

4. 成型加工。根据切片处理的截面轮廓，在计算机控制下，相应的成型头（激光头或喷头）按各截面轮廓信息做扫描运动，在工作台上一层一层地堆积材料，然后将各层相黏结，最终得到原型产品。

5. 成型零件的后处理。从成型系统里取出成型件，进行打磨、抛光、涂挂，或放在高温炉中进行后烧结，进一步提高其强度。最终处理完成的零件即可作为成品使用。

7.2.3 快速成型技术分类

RP 技术结合了众多当代高新技术：计算机辅助设计、数控技术、激光技术、材料技术等，并将随着技术的更新而不断发展。自 1986 年出现至今，短短十几年，世界上已有大约二十多种不同的成形方法和工艺，而且新方法和工艺不断地出现。目前常用的 RP 技术的主要工艺有：光固化/立体光刻（SLA 工艺）；熔融沉积成形（FDM 工艺）；选择性激光烧结（SLS 工艺）；三维印刷（3DP 工艺）等。

1. SLA（Stereolithogrphy Apparatus）工艺

SLA 工艺也称光造型或立体光刻，由 Charles Hull 于 1984 年获美国专利。1986 年美国 3D Systems 公司推出商品化样机 SLA—1，这是世界上第一台快速原形系统。典型的 SLA 系统如图 7-1 所示。

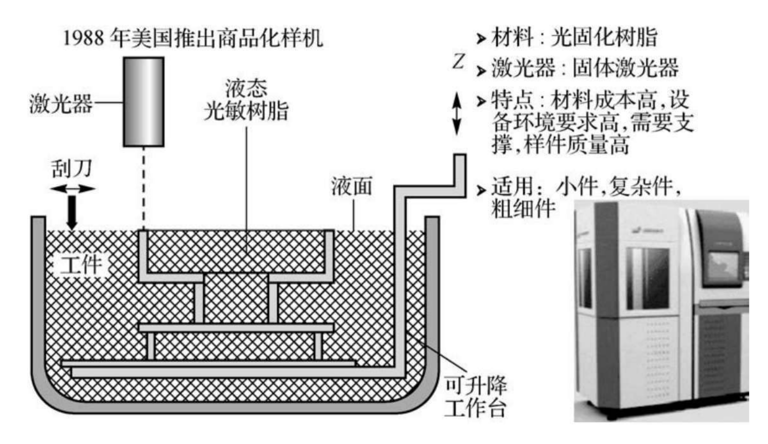


图 7-1　SLA 快速成型原理

SLA 技术基于液态光固化树脂的光聚合原理工作的。在一定波长和强度的紫外光照射，液态光固化树脂能迅速发生光聚合反应，分子量急剧增大，材料从液态转变成固态。

SLA 的工作过程是：首先通过计算机分层软件将待加工零件的数据分解为一个个截面数据。加工开始后，在液槽中盛满液态光固化树脂，激光束由计算机控制在液态表面上扫描，扫描的轨迹为零件的截面。由于光固化树脂被激光束扫描后产生光聚合反应，零件的截面就被固化出来。当一个截面扫描完成后，升降平台下降一层高度，用刮板将在成型的截面上铺上一层新的树脂，然后重复上一轮加工过程进行第二个截面的扫描，新固化的零件截面牢固地粘在之前加工完成的截面上，如此过程重复多次，直到整个零件的截面都扫描完成，即可得到一个三维实体模型。

SLA 方法发展早、适用范围广、精度高、成本较低，因此获得了广泛的青睐，是目前技术上最为成熟的快速成型工艺。但由于这种工艺只能使用光固化树脂作为加工材料，因此成型的零件性能具有局限性。且 SLA 工艺在加工中需要支撑结构；加工完成后由于树脂具有收缩性，会导致精度下降；光固化树脂有一定的毒性，以上这些缺点，都限制了 SLA 工艺更广泛的应用。

图 7-2 为 SLA 工艺方法加工的零件。

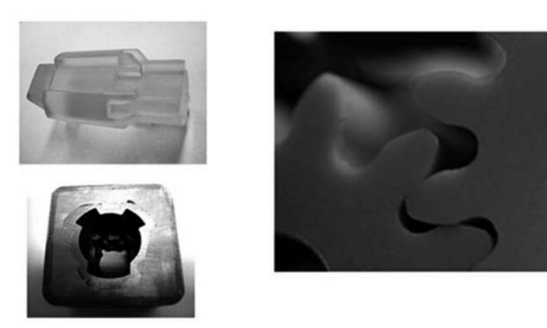


图 7-2　SLA 成型的零件

2. FDM（Fused Depostion Modeling）工艺

熔融沉积制造（FDM）工艺由美国学者 Scott Crump 于 1988 年研制成功。FDM 使用丝状的热塑性材料进行零件的制造（如蜡、ABS、尼龙等），如图 7-3 所示。在进行

加工时，同样通过计算机分层软件将待加工零件的数据分解为一个个截面数据。加工开始后，加热喷头将材料熔化，喷头在计算机控制下沿零件截面轮廓运动，并通过轨迹运动将截面内部填充完整，在整个运动过程中喷头不断往外挤出融化的材料。材料在挤出后迅速凝固，并与周围的材料凝结，形成一个完整的截面。如此往复多次后，即可制造完成整个零件。

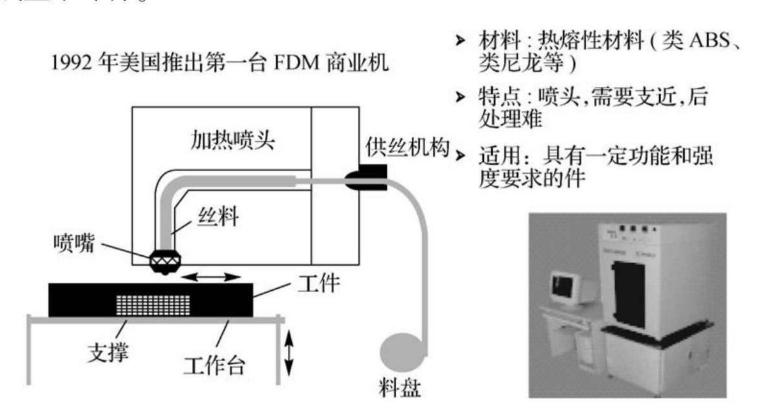


图 7－3　FDM 快速成型原理

FDM 工艺由于其成型过程不需要激光参与，因此具有使用、维护简单，成本较低等特点，目前 FDM 系统在全球已安装快速成型系统中的份额大约为 30%。相比于其他快速成型工艺，FDM 工艺具有以下优势。

（1）维护简单，成本低。由于 FDM 工艺不需要使用激光，因此系统成本较低。虽然 FDM 工艺的成型精度较差，但对于概念设计等使用场合，对原型产品并不要求很高的尺寸精度和物理化学特性，此时 FDM 工艺成本低、维护简单的优势使其具有较好的使用优势；

（2）系统清洁，更换容易。由于 FDM 工艺使用丝状塑料作为原料，没有粉末和液体的污染，因此在清理时更加容易。且原材料的保存、更换都更加方便；

（3）后处理简单。由于不需求清理残留的粉末和液体，因此 FDM 工艺仅需要几分钟到一刻钟的时间剥离支撑后，原型即可使用；

（4）材料性能好。随着 FDM 工艺的发展，目前使用 PC，PC/ABS，PPSF 等材料制作的零件强度已经接近或超过普通注塑零件，已可以直接作为结构件使用。图 7－4 为用 FDM 工艺方法加工的模型：

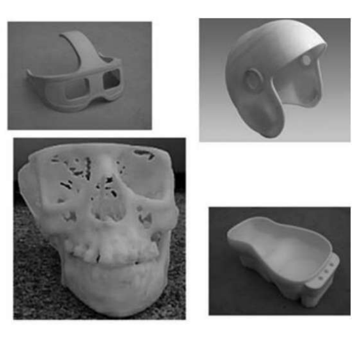


图 7－4　FDM 成型的零件

3. SLS（Selective Laser Sintering）工艺

SLS 工艺称为选择性激光烧结工艺，最早由美国德克萨斯大学奥斯汀分校 C. R. Dechard 于 1989 年研制成功。SLS 工艺采用粉末材料作为成型材料，在成型开始时，将材料粉末铺洒在成型平台上，用刮板刮平后，使用高强度的 CO2 激光器对材料进行烧结处理，使其烧结成零件截面的形状；当一层截面烧结完成后，重新在截面上铺上新的一层粉末，再次重复之前的烧结过程；如此往复将零件的所有截面都烧结在一起，之后将多余的粉末去除掉，并对加工完成的零件进行清洗、打磨、烘干等处理后，即得到所需的零件，如图 7-5 所示。

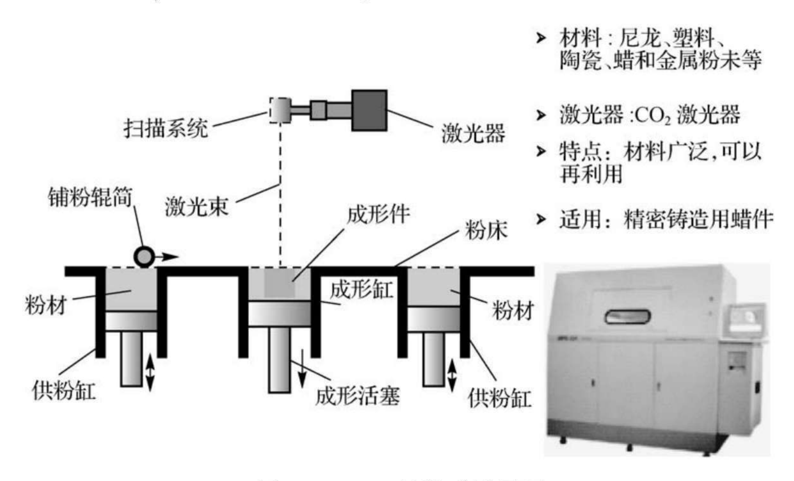


图 7-5　SLS 快速成型原理

SLS 工艺最大的特点在于不仅能制造塑料零件，甚至还可以制造金属零件，且其加工精度较高，这使 SLS 工艺日益受到工业界的重视，正日益发展为制造复杂精密金属快速样件的重要手段。图 7-6 为用 SLS 工艺方法加工的模型。



图 7-6　SLS 成型的零件

4. 3DP（Three Dimension Printing）工艺

三维印刷（3DP）由美国麻省理工学院 Emanual Sachs 等人研制，E. M. Sachs 于 1989 年申请了 3DP（Three-Dimensional Printing）专利，该专利是非成形材料微滴喷射成形范畴的核心专利之一，如图 7-7 所示。3DP 工艺与 SLS 工艺类似，采用粉末材料成形，如陶瓷粉末，金属粉末。所不同的是材料粉末不是通过烧结连接起来的，而是

通过喷头用黏接剂（如硅胶）将零件的截面“印刷”在材料粉末上面。用黏接剂粘接的零件强度较低，还须后处理，先烧掉黏结剂，然后在高温下渗入金属，使零件致密化，提高强度。

具体工艺过程如下：上一层粘结完毕后，成型缸下降一个距离（等于层厚：0.013~0.1mm），供粉缸上升一高度，推出若干粉末，并被铺粉辊推到成型缸，铺平并被压实。喷头在计算机控制下，按下一建造截面的成形数据有选择地喷射黏结剂建造层面。铺粉辊铺粉时多余的粉末被集粉装置收集。如此周而复始地送粉、铺粉和喷射黏结剂，最终完成一个三维粉体的黏结。未被喷射黏结剂的地方为干粉，在成形过程中起支撑作用，且成形结束后，比较容易去除。

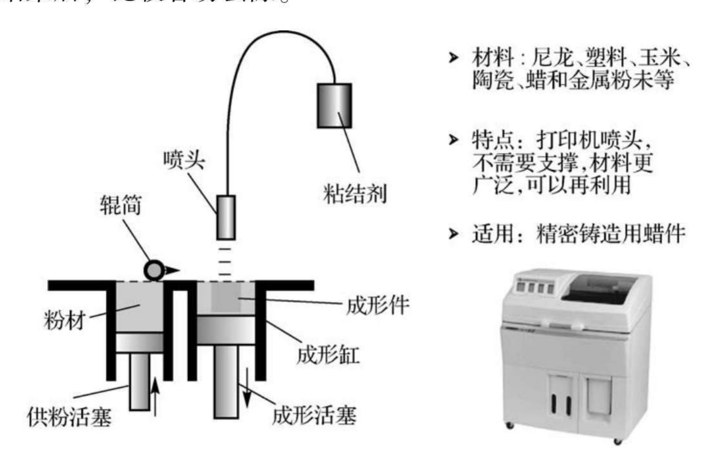


图 7－7　3DP 快速成型原理

该工艺的特点是成形速度快，成形材料价格低，适合做桌面型的快速成型设备。并且可以在黏结剂中添加颜料，可以制作彩色原型，这是该工艺最具竞争力的特点之一，有限元分析模型和多部件装配体非常适合用该工艺制造。缺点是成形件的强度较低，只能做概念型使用，而不能做功能性试验。



7.3　逆向工程技术

7.3.1　逆向工程技术简介

1. 逆向工程技术的起源与发展

逆向工程技术源于工业领域中的零件分析设计需求，是一种对现有产品的设计再现过程。在机械设计阶段借鉴现有成熟产品是一种快速、高效的设计方法，但由于商业机密、技术封锁等手段的限制，经常会出现不能轻易获得必要的设计信息的情况。此时采用从市场上购买成品，利用逆向工程技术分析成品的相关信息，并通过相应的技术分析推导出产品的设计原理，进而指导新产品的设计，即是逆向工程技术的典型案例。

早期的逆向工程技术大多采用人工测绘、手工制图/制模的方式进行，存在效率低、误差大、对测绘人员技术要求高等缺陷。随着计算机及测量技术的发展进步，逆

向工程技术已经可以利用激光扫描仪、三坐标测量机、X 射线断层成像等 3D 扫描技术对逆向对象进行尺寸测量，并通过计算机处理后直接构筑成 3D 虚拟模型。常见的三维扫描设备扫描的大多是测量对象表面或结构内部的特定点坐标，并最终生成由这些点组成的点云数据。但由于由点云数据构成的 3D 模型没有面数据那样直观，所以为了提高逆向扫描后数据的可视性和应用范围，逆向扫描后的数据通常经过一些后处理软件处理，将点云数据转化为曲面数据后再使用，如 3 - matic、Imageware、PolyWorks、Rapidform 或者 Geomagic 都是较为常见的转化软件。

2. 逆向工程技术实现方式及应用

实现逆向工程技术的关键在于如何实现对逆向对象的信息采集。这其中如何实现逆向对象的外形尺寸测量是逆向工程技术的核心难点之一。由于机械领域的零件通常为复杂的立体结构，实现其尺寸测量可以看作是对零件各点的 X、Y、Z 三个空间坐标的测量，以下简称三坐标测量。目前常规的三坐标测量技术可分为接触式测量和非接触式测量两大类。

接触式测量方法使用能够测量自身坐标的传感测量头与样件表面选定的点接触，通过自动或人工测量测量头的坐标位置，从而得到被测样件表面的坐标位置。由于接触式测量中的被测样件表面的测量点可以人为规划，这样在测量样件表面大曲率或形状复杂区域时可以规划较多的测量点，而在相对平坦和简单的区域则可以规划较少的测量点。这样通过对被测物体的区域划分，可以重点测量样件的关键特征线和关键曲面，可以增加测量精度、减少测量工作量、提高测量效率。对于零件尺寸大、精度要求高、零件形状复杂的航空航天、汽车等行业，一般使用接触式测量的方式，以满足精度要求。接触式测量虽然具有精度高、测量尺寸大的优点，但同时也具有测量效率较低、设备庞大、对测量环境要求较高等缺点。

非接触式测量方法利用光学、声学、磁学测量手段，在测量过程中测量仪器不需要接触到样件表面的坐标点。非接触式测量可以在短时间内快速获得测量样件表面大量点的坐标数据，例如某些光学测量机可以在数秒钟内测量样件表面几十万个点的坐标，获得的数据量非常庞大。因此非接触式测量技术必须配合较强功能的逆向软件和高性能的计算机设备，才能顺利使用。随着计算机硬件的性能和软件技术的进步，基于光学的非接触式测量方法和三坐标测量设备在逆向工程中得到了更为广泛的应用。由于非接触式测量速度快、效率高、操作简便、可适用于多种复杂环境，因而被广泛应用于大型零件测量、人像扫描等领域。近年来，以激光测距法为代表的非接触式测量技术发展迅速，应用普及面越来越广，已成为非接触式测量的代表性技术。

逆向工程技术广泛应用于新产品开发和产品改型设计、产品仿制、质量分析检测等领域。随着快速成型技术（RP 技术）的快速发展，利用逆向工程技术生成样件 3D 模型后，直接在计算机上对 3D 模型进行设计修改，之后采用快速成型工艺进行制造，可在短时间内实现样件的仿制和改型研制。相比于传统产品设计开发方式，此种模式具备更高的快速性和灵活性，因此逆向工程技术日益成为现代工程设计领域不可或缺的重要技术。

7.3.2　逆向工程技术的发展

现代逆向工程技术兴起的时间较短，但发展迅速。80 年代时部分欧美国家开始研发早期的逆向工程技术，最早是对样件人工测量后，利用早期的计算机 CAD 软件进行

建模，再使用数控设备进行加工，制作出来的仿制品尺寸误差较大、质量一般。随着计算机自动控制的接触式扫描设备的发展，逆向工程里开始运用接触式测量设备，这使得对样件的测量精度得到很大提高。进入 21 世纪后，随着图像识别、激光测量、计算机数据处理技术的进步，非接触式测量设备得到了很大的发展，基于非接触式测量设备的逆向工程技术成为发展热点。近年来，随着快速成型技术的兴起，逆向工程技术更展现出新的发展活力。

逆向工程技术的发展离不开逆向工程软件的发展。目前研究或应用中的逆向工程软件可分以下几类。

1. 专用型软件：此类软件往往针对某一类具体的零件类型，例如专门识别平面零件或者回转体零件等。此类软件开发简单、用途单一、适应性不高；

2. 集成型软件：此类软件是目前逆向工程软件的主流，通过集成测量和曲面拟合功能，将测量和数据建模的过程无缝链接，可以减少系统的复杂程度、增加测量和转换时的数据精度、提高测量效率；

3. 逆向测量/制造集成型软件：此类软件是逆向工程软件的发展方向。通过在集成型软件的基础上增加工艺规划、刀具路径规划等功能，可以实现集成测量/数据拟合/工艺规划/制造功能的集成，从而实现缩短产品制造周期的目的。

由于逆向工程技术起步较晚、技术难点多、系统集成复杂，因此当前使用的逆向工程系统存在以下不足之处。

1. 大多数系统是针对具体的应用而开发，数据处理往往针对特定的测量设备、测量对象，通用性差。

2. 曲面拟合系统大多是对于代数二次曲面，对自由曲面，特别是由大数据量散乱点拟合自由曲面，系统一般没有此功能

3. 数据区域分割往往要交互操作，降低了 CAD 建模的速度，自动化程度低；

4. 系统集成化程度低，有些系统只侧重于曲面的拟合，有些系统只侧重于与特定制造技术的结合，系统只包含简单几何数据，不符合现代设计制造的并行思想。

几何建模是逆向工程的关键环节，同时也是影响逆向工程速度的瓶颈问题，因此，提高逆向工程几何建模的自动化程度和通用性是逆向工程研究的一个重点方向。

7.3.3　3D CaMega 三维光学扫描仪操作简介

1. 3D CaMega 三维扫描仪简介

3D CaMega 三维光学扫描仪由三脚架、机壳、投影镜头、相机镜头组成。投影镜头将可见光光栅条纹图像投影到待测物体表面，通过相机镜头拍摄物体不同部位光栅图像，由 CCD 将拍摄到的条纹图像输入到计算机中，三维图像反求软件根据条纹按照曲率变化的形状利用相位法和三角法等精确的计算出物体表面每一点的空间坐标（X、Y、Z）。



图 7 - 8　3D CaMaga 三维扫描仪外观

2. 3D CaMega 三维扫描仪操作步骤

（1）调试

确定视场　根据相机与被测物体位置关系选择标记距离。若相机处于被测物体外侧，距离为 780mm；若相机处于被测物体内部，距离为 400mm（下面的案例以 780mm 为例）；

镜头选择　根据被测物体大小选择镜头视场。若被测物体较大则选择大视场的镜头（600 视场、400 视场等），若被测物体较小选择小视场镜头（100 视场、50 视场等）；

调整投影　选择一面石灰白墙（不会产生镜面反光），或者一块白板，将投影镜头与墙的距离调整为 780mm；调整投影光圈，让投影投出清晰均匀的光（通过旋转调整前后光圈调节投影清晰度）；

调整相机　调整相机光圈和角度，让相机中线与投影中线重合和黄色竖线重合，如图 7 - 9 所示。

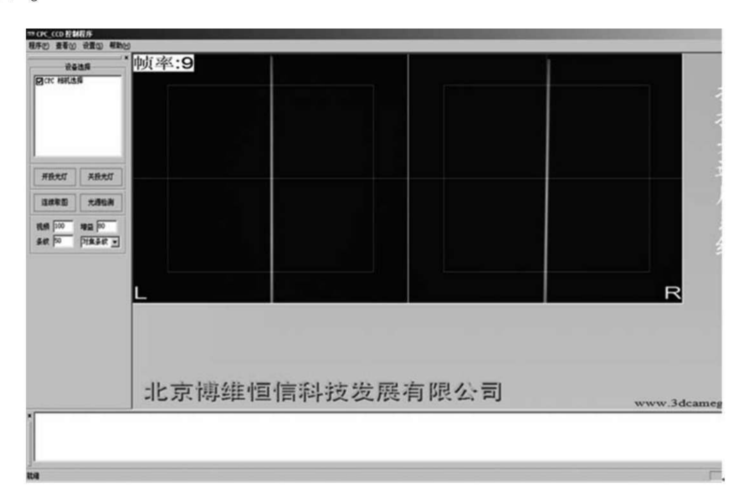


图 7 - 9　调整相机角度

调整光圈　开投光灯，把左右光圈调成一致，大约在 100 ~ 200 之间，保证条纹清晰（左右相机的差值在 5 个值之内）。



图 7－10　调整左右光圈

（2）标定

将标定板放置于距相机 780mm 处，同时调整标点板角度和高度，使对焦线与标定块竖线的两个白点重合。如图 7－11 所示。

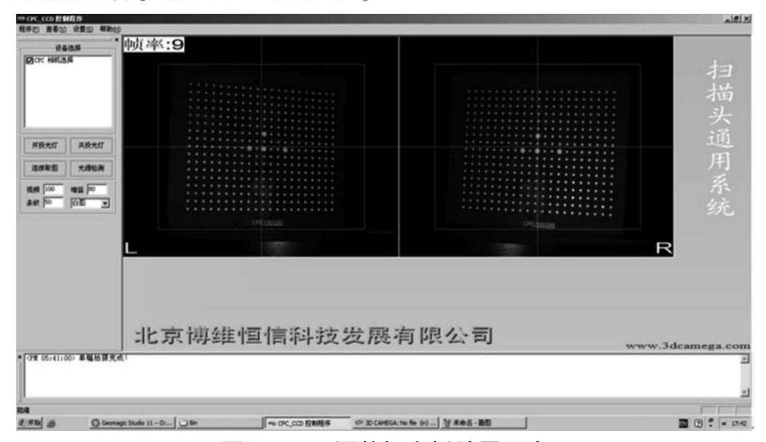
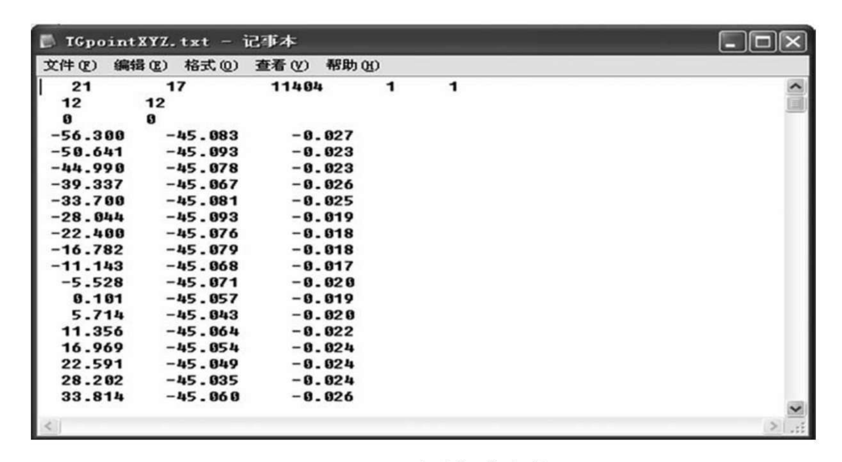


图 7－11　调整标定板放置距离

查看扫描软件安装根目录中 mk7dat \ kernel 中的文件 TGpointXYZ. txt，确认对应参数点间距是否为 12，如图 7－12 所示。



TGpointXYZ.txt － 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

```
  21        17        11404      1      1
 12        12
  0         0
-56.300    -45.083    -0.027
-50.641    -45.093    -0.023
-44.990    -45.078    -0.023
-39.337    -45.067    -0.026
-33.700    -45.081    -0.025
-28.044    -45.093    -0.019
-22.400    -45.076    -0.018
-16.782    -45.079    -0.018
-11.143    -45.068    -0.017
 -5.528    -45.071    -0.020
  0.101    -45.057    -0.019
  5.714    -45.043    -0.020
 11.356    -45.064    -0.022
 16.969    -45.054    -0.024
 22.591    -45.049    -0.024
 28.202    -45.035    -0.024
 33.814    -45.060    -0.026
```

图 7－12　确认标定参数

开始相机标定　先将标定块放在转台中心并保持稳定，直立正对相机，转台调整为零度。打开 CPC 控制软件和 winmoire，观察 CPC 控制软件里的预览，让标定块处于两相机视图中间（最佳位置效果图如图 7－11 所示）。切换到 winmoire，在菜单“标定”下点击“相机标定 5”，弹出如图 7－13 所示对话框。

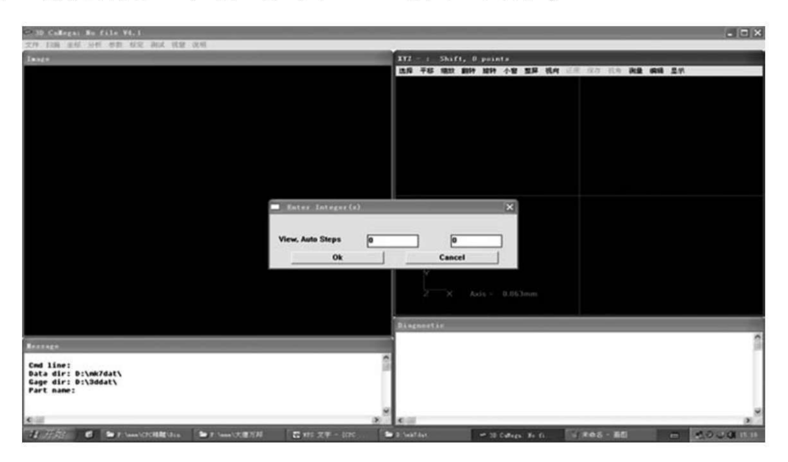


图 7－13　在 winmoire 内设置相机参数

手工标定　要手动标定相机，将图 7－14 上弹出的对话框参数设置为 0—0。开始标定后，先将标定板正对镜头，正拍一次；再把标定板左偏 20 度，点击 OK；继续把标定板右偏 20 度，点击 OK；最后在弹出的对话框上点击 NO，完成相机标定。

自动标定　要自动标定相机，将图 7－14 上弹出的对话框参数设置为 0—3，将标定板放置于自动转台的正中，点击 ok，设备会自动完成标定过程。



图 7－14　自动标定的参数设置

标定结果标定完成后，查看软件标定参数，确保自动标定结果在 0.1 以下，如图 7－15 所示。

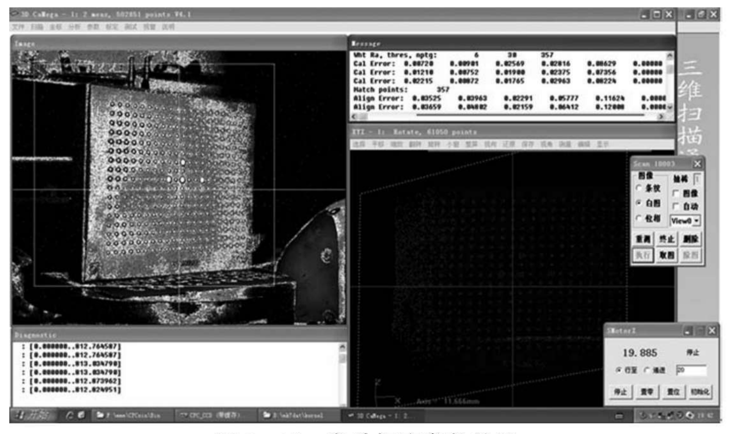


图 7－15　自动标定参数结果

（3）扫描和数据保存

相机标定完成后，打开 winmoire，进行试拍扫描。将设备设置为自动扫描状态，在文件菜单内选自动测量，winmoire 会弹出文件对话框，如图 7－16、图 7－17 所示，输入文件名（使用字母和数字组合）。

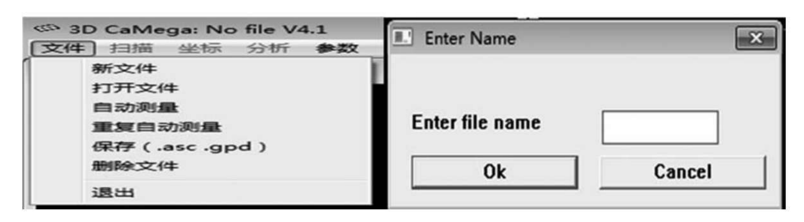
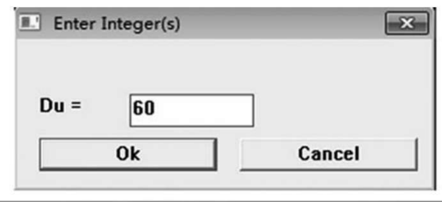


图 7－16　设置设备为自动测量状态

输入扫描度数，点击 OK，设备开始自动扫描，如图 7－17 所示。



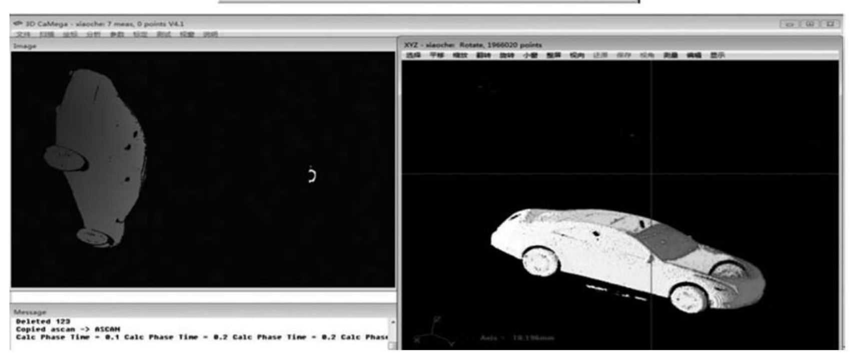


图 7－17　开始扫描过程

扫描完成后，通过 winmoire 软件内的文件选项，将文件保存成 . asc 或 gpd 格式的文件，供第三方软件进行后续的数据处理工作。

由于扫描完成后生成的数据为点云数据，但在实际使用过程中面数据更加直观形象，也更方便进行修改。因此在扫描生成了 asc 或 gpd 格式的文件后，可以使用 Geomagic 等软件对数据进行处理，将点云数据拟合为面数据，关于 Geomagic 软件的相关操作本书不再赘述，感兴趣的同学可自行参阅相关书籍。



7.4　快速成型训练实例

使用 UP！3DP 打印机，完成一个快速成型作品的成型过程。操作步骤如表 7－1 所示。

表 7－1　UP！3DP 打印机操作步骤

序号	操作简图	操作内容	步骤
1		从桌面和开始菜单中的快捷方式都可以启动 Up 软件。软件启动后界面如左图所示	启动软件
2		载入 STL 模型的方式有多种：选择菜单“文件>打开”或工具栏中 按钮，选择一个想要的模型文件	载入模型
3		在打印之前，需要初始化打印机。点击 3D 打印菜单下面的初始化选项，当打印机发出蜂鸣声，初始化即开始。打印喷头和打印平台将再次返回到打印机的初始位置，当准备好后将再次发出蜂鸣声	初始化打印机
4		正确校准喷嘴高度之前，需要检查喷嘴和打印平台四个角的距离是否一致。校准前，将水平校准器吸附至喷头下侧，并将 3.5mm 双头线依次插入水平校准器和机器后方底部的插口，当点击软件中的“自动水平校准”选项时，水平校准器将会依次对平台的九个点进行校准，并自动列出当前各点数值	调平打印机

续表

序号	操作简图	操作内容	步骤
5		在设定喷嘴高度前，可以借助打印平台后部的“自动对高块”来测试喷嘴高度。测试前，将水平校准器自喷头取下，并确保喷嘴干净以便测量准确。将 3.5mm 双头线分别插入自动对高块和机器后方底部的插口，然后点击软件中的“喷嘴高度测试选项”，平台会逐渐上升，接近喷嘴时，上升速度会变得非常缓慢，直至喷嘴触及自动对高块上的弹片，测试即完成，软件将会弹出喷嘴当前高度的提示框	校准喷嘴高度
6		点击 3D 打印菜单中的维护选项，按照图所示的对话框进行操作	其他维护选项
7		打印前，须将平台备好，才能保证模型稳固。可借助平台自带的八个弹簧固定打印平板，在打印平台下方有八个小型弹簧，将平板按正确方向置于平台上，然后轻轻拨动弹簧以便卡住平板。板上均匀分布孔洞。一旦打印开始，塑料丝将填充进板孔，这样可以为模型的后续打印提供更强有力的支撑结构	准备打印平台
8		点击软件“三维打印”选项内的“设置”，将会出现如下的界面	打印设置选项

续表

序号	操作简图	操作内容	步骤
9		点击 3D 打印菜单的预热按钮，打印机开始对平台加热。在温度达到 100℃时开始打印 点击 3D 打印的打印按钮，在打印对话框中设置打印参数（如质量），点击 OK 开始打印	开始打印
10		当模型完成打印时，打印机会发出蜂鸣声，喷嘴和打印平台会停止加热 将扣在打印平台周围的弹簧顺时针别在平台底部，将打印平台轻轻撤出 在模型下面把铲刀慢慢地滑动到模型下面，来回撬松模型。切记在撬模型时要佩戴手套以防烫伤 （注意：在撤出模型之前要先撤下打印平台。如果不这样做，很可能使整个平台弯曲，导致喷头和打印平台的角度改变。在移除模型时戴上随机配套的手套）	移出模型

思考题

1. 简述什么是快速成型技术，相比于传统加工技术其具有哪些优势？
2. 简述快速成型技术的典型工艺过程？
3. 快速成型技术的分类有哪些，各自的原理是什么？
4. 逆向工程技术的定义是什么，其具体的实现方式是怎样的？
5. 接触式测量和非接触式测量的实现方式有何区别，各自适用于哪些应用场合？

第三篇
传统机械加工



第8章 普通车削加工技术

教学目的和要求：车削加工是金工训练的主要训练项目之一，是切削加工最常见的加工方法。车削训练主要是介绍普通车的床结构、传动原理、加工工艺方面的知识，培养学生操作和维护车床等方面的综合能力；通过加工实例的讲解，使学生能更好地熟悉车削工艺知识、掌握车削加工技能。车削加工要求学生了解常用车床的分类、型号、组成、用途；了解常用车刀的材料、种类、应用范围；了解车床的运动、传动链、切削用量的概念及合理选择满足工艺要求的切削用量；熟悉车削加工安全操作规程；熟悉车刀、量具和主要附件的基本结构与使用方法；初步掌握车床的基本操作方法以及车削加工质量的控制。



8.1 普通车削加工的概述

8.1.1 普通车削加工的原理

车削加工就是利用车床上工件的旋转运动和刀具的直线或曲线运动来改变毛坯的形状和尺寸，把装夹在机床主轴端面卡盘上的毛坯加工成合格零件的过程。车削是最基本、最常见的切削方式，在生产中占有十分重要的地位。

车削加工的切削动力主要由工件旋转运动提供。车削适于加工回转表面或大部分具有回转表面的工件。如内外圆柱面、内外圆锥面、端面、沟槽、螺纹和回转成形面等。

在各类金属切削机床中，车床是应用最广泛的一类，约占机床总数的50%。车床既可用车刀对工件进行车削加工，又可用钻头、铰刀、丝锥和滚花刀进行钻孔、铰孔、攻螺纹和滚花等操作。

8.1.2 普通车床的组成及其作用：

为充分了解普通车床的结构组成及其作用，现以C6132A型车床为例介绍其结构：

1. 主轴箱

主轴箱又称床头箱，内装主轴和变速机构。变速是通过改变设在床头箱外面的手柄位置，可使主轴获得多种不同的转速（45~2100 r/min）。主轴是空心结构，棒料能通过主轴孔的最大直径是55mm。主轴的右端有外螺纹，用以连接卡盘、拨盘等附件。

主轴右端的内表面是莫氏 6 号的锥孔，可插入锥套和顶尖，当采用双顶尖装夹轴类工件时，其两顶尖之间的最大距离为 750mm。床头箱的另一重要作用是将运动传给进给箱，可以改变进给方向。

2. 进给箱

进给箱又称走刀箱，它是固定在床头箱下部的床身前侧面进给运动的变速机构。变换进给箱外面的手柄位置，可将主轴传递下来的运动，转为进给箱输出的光杆或丝杆获得不同的转速，以改变进给量的大小或车削不同螺距的螺纹。其纵向进给量为 0.04~0.78mm/r；横向进给量为 0.06~1.07mm/r；可车削 17 种公制螺纹（螺距为 0.5~9mm）和 32 种英制螺纹（每英寸 2~38 牙）。

3. 溜板箱

溜板箱又称拖板箱，溜板箱是进给运动的操纵机构。它使光杠或丝杠的旋转运动，通过齿轮和齿条或丝杠和开合螺母，推动车刀作进给运动。溜板箱上有三层滑板，当接通光杠时，可使床鞍带动中滑板、小滑板及刀架沿床身导轨作纵向移动；中滑板可带动小滑板及刀架沿床鞍上的导轨作横向移动。故刀架可作纵向或横向直线进给运动。当接通丝杠并闭合开合螺母时可车削螺纹。溜板箱内设有互锁机构，使光杠、丝杠两者不能同时使用。

4. 刀架

刀架是多层结构，用来装夹车刀，并可作纵向、横向及斜向运动，由下列组成。

床鞍：它与溜板箱牢固相连，可沿床身导轨作纵向移动。

中滑板：它装置在床鞍顶面的横向导轨上，可作横向移动。

转盘：它固定在中滑板上，松开紧固螺母后，可转动转盘，使它和床身导轨成一个所需要的角度，而后再拧紧螺母，可以加工圆锥面等。

小滑板：它装在转盘上面的燕尾槽内，可作短距离的进给移动。

方刀架：它固定在小滑板上，可同时装夹四把车刀。松开锁紧手柄，即可转动方刀架，把所需要的车刀更换到工作位置上。

5. 光杠与丝杠

光杠与丝杠将进给箱的运动传至溜板箱。光杠用于一般车削，丝杠用于车螺纹。

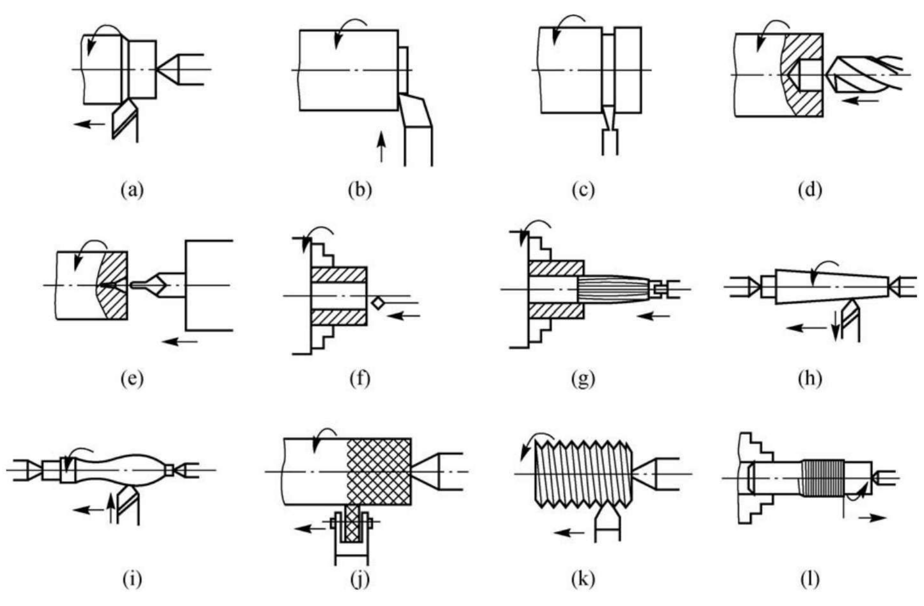
6. 床身

床身是车床的基础件，用来连接各主要部件并保证各部件在运动时有正确的相对位置。在床身上有供溜板箱和尾座移动用的导轨。

8.1.3 车床的加工对象

车削加工主要用来加工零件上的回转表面，加工精度达 ITll~IT6，表面粗糙度 Ra 值达 12.5~0.8μmm。

车削加工应用范围很广泛，它可完成的主要工作如图 8-1 所示。



（a）车外圆（b）车端面（c）切槽（切断）（d）钻孔（e）钻中心孔（f）镗孔（g）扩孔（锪孔）（h）车外圆锥面（i）车外圆成型面（j）滚花（k）车螺纹（l）盘绕弹簧

图 8－1　普通车床加工范围

8.1.4　车削运动和车削用量

1. 车削运动

车削加工时，工件与刀具的相对运动叫车削运动。根据运动的性质和作用不同，车削运动可分为主运动和进给运动两类。车削时工件的旋转为主运动，车削时刀具的纵、横向移动为进给运动。

2. 车削表面

车削时，在工件表面一般会出现三个表面，即已加工表面、待加工表面和过渡表面，如图 8－2 所示。

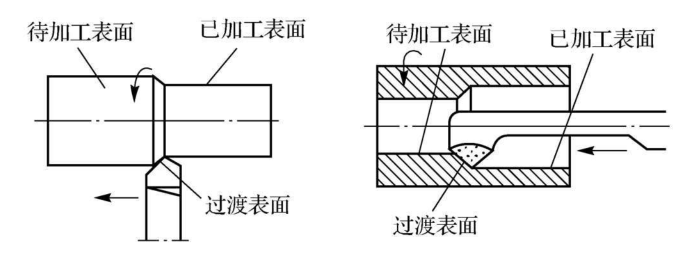


图 8－2　车削的表面

3. 车削用量

车削时，车削用量是指车削速度、进给量和背吃刀量。它们对加工质量、生产率及加工成本有很大影响，合理选择切削用量是保证加工零件的质量、提高生产效率、

降低生产成本的有效方法之一，车削时车削用量主要从如下方面选择：

（1）粗加工时，在机床刚度及功率允许的前提下，首先应选择大的背吃刀量 a_p，尽量在一次走刀过程中切去大部分多余金属，其次取较大的进给量，最后选择适当的切削速度 $\boldsymbol{v}_c$。

（2）精加工时，应当保证工件的加工精度和表面粗糙度。此时加工余量小，一般应取小的背吃刀量 a_p 和进给量，以降低表面粗糙度值，然后再选择较高或较低的切削速度 v_c。

（3）车削外圆时，背吃刀量可以参照表 8－1 外圆车削背吃刀量选择表进行选择；车削外圆或端面时，车削进给量可以参照表 8－2 高速钢及硬质合金车刀车削外圆及端面的粗车进给量进行选择；车削表面有粗糙度要求时，车削进给量可以参照表 8－3 按表面粗糙度选择进给量的参考值进行选择。

表 8－1　外圆车削背吃刀量选择表（端面切深减半）

轴径	长度											
	≤100		>100~250		>250~500		>500~800		>800~1200		>1200~2000	
	半精	精车	半精	精车	半精	精车	半精	精车	半精	精车	半精	精车
≤10	0.8	0.2	0.9	0.2	1	0.3	—	—	—	—	—	—
>10~18	0.9	0.2	0.9	0.3	1	0.3	1.1	0.3	—	—	—	—
>18~30	1	0.3	1	0.3	1.1	0.3	1.3	0.4	1.4	0.4	—	—
>30~50	1.1	0.3	1	0.3	1.1	0.4	1.3	0.5	1.5	0.6	1.7	0.6
>50~80	1.1	0.3	1.1	0.4	1.2	0.4	1.4	0.5	1.6	0.6	1.8	0.7
>80~120	1.1	0.4	1.2	0.4	1.2	0.5	1.4	0.5	1.6	0.6	1.9	0.7
>120~180	1.2	0.5	1.2	0.5	1.3	0.6	1.5	0.6	1.7	0.7	2	0.8
>180~260	1.3	0.5	1.3	0.6	1.4	0.6	1.6	0.7	1.8	0.8	2	0.9
>260~360	1.3	0.6	1.4	0.6	1.5	0.7	1.7	0.7	1.9	0.8	2.1	0.9
>360~500	1.4	0.7	1.5	0.7	1.5	0.8	1.7	0.8	1.9	0.9	2.2	

1. 粗加工，表面粗糙度为 Ra50~12.5 时，一次走刀应尽可能切除全部余量。
2. 粗车背吃刀量的最大值是受车床功率的大小决定的。中等功率机床可以达到 8~10mm。

表8-2　高速钢及硬质合金车刀车削外圆及端面的粗车进给量

工件材料	车刀刀杆尺寸（mm）	工件直径（mm）	切深				
			≤3	3~5	5~8	8~12	>12
			进给量f　mm/r				
碳素结构钢、合金结构钢、耐热钢	16×25	20	0.3~0.4	—	—	—	—
		40	0.4~0.5	0.3~0.4	—	—	—
		60	0.5~0.7	0.4~0.6	0.3~0.5	—	—
		100	0.6~0.9	0.5~0.7	0.5~0.6	0.4~0.5	—
		400	0.8~1.2	0.7~1	0.6~0.8	0.5~0.6	—
	20×30 25×25	20	0.3~0.4	—	—	—	—
		40	0.4~0.5	0.3~0.4	—	—	—
		60	0.6~0.7	0.5~0.7	0.4~0.6	—	—
		100	0.8~1	0.7~0.9	0.5~0.7	0.4~0.7	—
		400	1.2~1.4	1~1.2	0.8~1	0.6~0.9	0.4~0.6
铸铁及铜合金	16×25	40	0.4~0.5	—	—	—	—
		60	0.6~0.8	0.5~0.8	0.4~0.6	—	—
		100	0.8~1.2	0.7~1	0.6~0.8	0.5~0.7	—
		400	1~1.4	1~1.2	0.8~1	0.6~0.8	—
铸铁及铜合金	20×30 25×25	40	0.4~0.5	—	—	—	—
		60	0.6~0.9	0.5~0.8	0.4~0.7	—	—
		100	0.9~1.3	0.8~1.2	0.7~1	0.5~0.8	—
		400	1.2~1.8	1.2~1.6	1~1.3	0.9~1.1	0.7~0.9

1. 断续切削、有冲击载荷时，乘以修正系数：$k=0.75\sim0.85$。
2. 加工耐热钢及其合金时，进给量应不大于1mm/r。
3. 无外皮时，表内进给量应乘以系数：$k=1.1$。
4. 加工淬硬钢时，进给量应减小。硬度为HRC45-56时，乘以修正系数：0.8，硬度为HRC57-62，乘以修正系数：$k=0.5$。

表 8-3　按表面粗糙度选择进给量的参考值

工件材料	粗糙度等级（*Ra*）	切削速度（m/min）	刀尖圆弧半径		
			0.5	1	2
			进给量 *f*（mm/r）		
碳钢及合金碳钢	10~5	≤50	0.3~0.5	0.45~0.6	0.55~0.7
		>50	0.4~0.55	0.55~0.65	0.65~0.7
	5~2.5	≤50	0.18~0.25	0.25~0.3	0.3~0.4
		>50	0.25~0.3	0.3~0.35	0.35~0.5
	2.5~1.25	≤50	0.1	0.11~0.15	0.15~0.22
		50~100	0.11~0.16	0.16~0.25	0.25~0.35
		>100	0.16~0.2	0.2~0.25	0.25~0.35
铸铁及铜合金	10~5	不限	0.25~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6
	5~2.5		0.15~0.25	0.25~0.4	0.4~0.6
	2.5~1.25		0.1~0.15	0.15~0.25	0.2~0.35

注：适用于半精车和精车的进给量的选择



8.2　车削刀具及车床附件

刀具材料是决定刀具切削性能的根本因素，对加工效率、加工质量以及刀具耐用度影响很大。使用碳工具钢作为刀具材料时，切削速度只有 10m/min 左右；20 世纪初出现了高速钢刀具材料，切削速度提高到每分钟几十米；20 世纪 30 年代出现了硬质合金刀具材料，切削速度提高到每分钟一百多米至几百米；当前陶瓷刀具和超硬材料刀具的出现，使切削速度提高到每分钟一千米以上。被加工材料的发展也大大地推动了刀具材料的发展。

8.2.1　车削刀具的分类

1. 车刀的结构形式

车刀切削部分通常叫作刀头，装夹在刀架上的部分通常叫刀杆，刀头切削刃与轴线位置角度不同，常有如下几类刀具（如图 8-3 所示）。

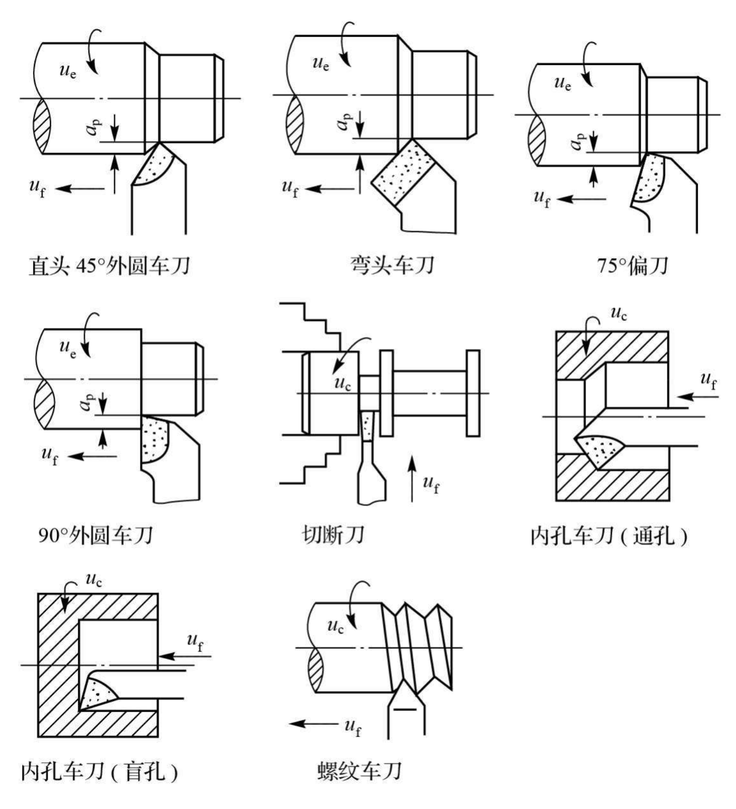


图 8－3　常见车刀刀头分类

2. 车刀的分类

(1) 按用途可分为：

外圆车刀：主偏角一般取 45°、75°和 90°，用于车削外圆表面和台阶；

端面车刀：主偏角一般取 45°，用于车削端面和倒角，也可用来车外圆；

切断、切槽刀：用于切断工件或车沟槽。

镗孔刀：用于车削工件的内圆表面，如圆柱孔、圆锥孔等；

成形刀：有凹、凸之分。用于车削圆角和圆槽或者各种特形面；

内、外螺纹车刀：用于车削外螺纹和内螺纹。

(2) 按结构车刀可分为：

整体式车刀：刀头部分和刀杆部分均为同一种材料的整体式刀具。用作整体式车刀的刀具材料一般是高速钢。

焊接式车刀：刀头部分和刀杆部分分属两种材料。即刀杆上镶焊硬质合金刀片，而后经刃磨所形成的车刀。

机械夹紧式车刀：将硬质合金刀片用机械夹紧的方法固定在刀杆上的。刀头部分和刀杆部分分属两种材料。机夹加紧式车刀刀片形状为多边形，即多条切削刃，多个刀尖，用钝后只需将刀片转位即可使新的刀尖和刀刃进行切削而不须重新刃磨。

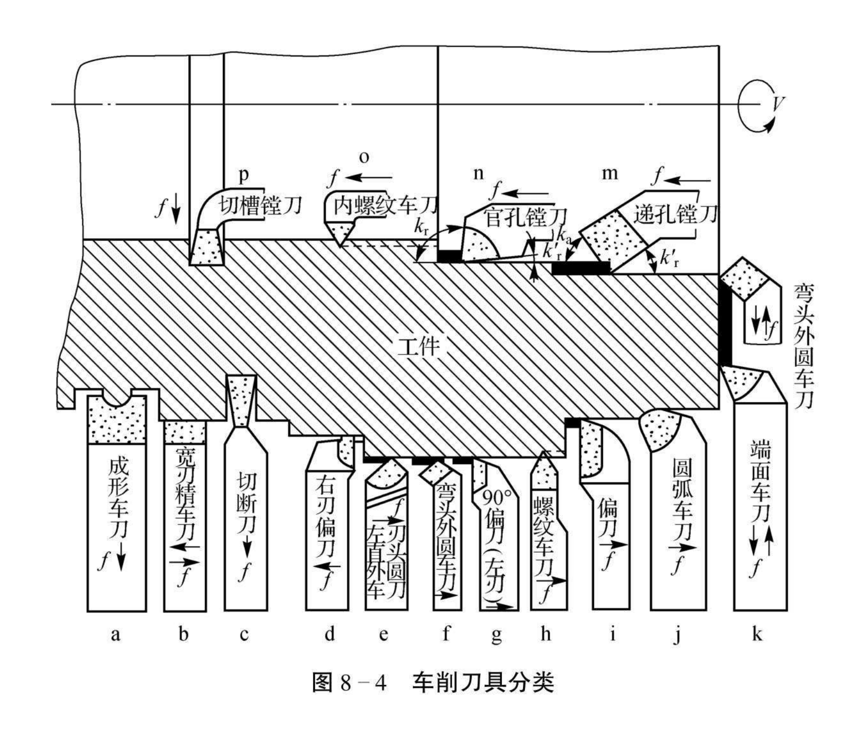


图 8-4 车削刀具分类

8.2.2 普通车削的附件

1. 三爪卡盘

三爪卡盘是由盘体、小锥齿轮、大锥齿轮和三个卡爪组成。如图 8-5 所示。三个卡爪上有与平面螺纹相应螺牙与之配合，三个卡爪在爪盘体中的导槽中呈 120°均布。盘体的锥孔与车床主轴前端的外锥面配合，起对中作用，通过键来传递扭矩，最后用螺母将卡盘体锁紧在主轴上。

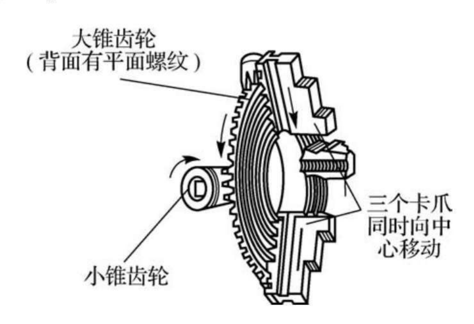


图 8-5 三爪卡盘实物与结构图

当转动其中一个小锥齿轮时，即带动大锥齿轮转动，其上的平面螺纹又带动三个卡爪同时向中心或向外移动，能够自动定心。定心精度不高，约为 0.05~0.15mm。三个卡爪有正爪和反爪之分，有的卡盘可将卡爪反装即成反爪，当换上反爪即可安装较大直径的工件。当直径较小时，工件置于三个长爪之间装夹，可将三个卡爪伸入工件内孔中利用长爪的径向张力装夹盘、套、环状零件，当工件直径较大，用顺爪不便装夹时，可将三个顺爪换成反爪进行装夹，当工件长度大于 4 倍直径时，应在工件右端用尾座顶尖支撑 .

2. 四爪单动卡盘

四爪单动卡盘（如图 8-6 所示）全称是机床用手动四爪单动卡盘，是由一个盘体，四个丝杆，一副卡爪组成的。工作时是用四个丝杠分别带动四爪，因此常见的四爪单动卡盘没有自动定心的作用。但可以通过调整四爪位置，装夹各种矩形的、不规则的工件，每个卡爪都可单独运动。

工件装夹后（不可过紧），用划针对准工件外圆并留有一定的间隙，转动卡盘使工件旋转，观察划针在工件圆周上的间隙，调整最大间隙和最小间隙，使其达到间隙均匀一致，最后将工件夹紧。此种方法一般找正精度在 0.5~0.15 以内。



图 8-6　四爪单动卡盘实物图

3. 顶尖

顶尖是车床常见附件之一，顶尖根据结构不同，可以分为死顶尖和活顶尖两类。顶尖尾部带有锥柄，安装在机床主轴锥孔或尾座顶尖轴锥孔中，用其头部锥体顶住工件。可对端面复杂的零件和不允许打中心孔的零件进行支承。顶尖主要由顶针、夹紧装置、壳体、固定销、轴承和芯轴组成。顶针的一端可顶中心孔或管料的内孔，另一端可顶端面是球形或锥形的零件，顶针由夹紧装置固定。当零件不允许或无法打中心孔时，可用夹紧装置直接夹住车削。壳体与芯轴钻有销孔，用固定销的销入或去除来实现顶尖的死活二用。

4. 尾座

用于安装后顶尖，以支持较长工件进行加工，或安装钻头、铰刀等刀具进行孔加工。偏移尾架可以车出长工件的锥体。尾架的结构由下列部分组成。

套筒：其左端有锥孔，用以安装顶尖或锥柄刀具。套筒在尾架体内的轴向位置可用手轮调节，并可用锁紧手柄固定。将套筒退至极右位置时，即可卸出顶尖或刀具。

尾座体：它与底座相连，当松开固定螺钉，拧动螺杆可使尾架体在底板上作微量横向移动，以便使前后顶尖对准中心或偏移一定距离车削长锥面。

底座：它直接安装于床身导轨上，用以支承尾座体。



8.3　普通车削加工工艺

8.3.1　轴类零件车削工艺

为了进行科学的管理，在生产过程中，常把合理的工艺过程中的各项内容，编写成文件来指导生产。这类规定产品或零部件制造工艺过程和操作方法等的工艺文件叫工艺规程。一个零件可以用几种不同的加工方法制造，但在一定条件下只有某一种方法是较合理的。

如图 8－7 所示的传动轴，由外圆、轴肩、螺纹及螺纹退刀槽、砂轮越程槽等组成。中间一档外圆及轴肩一端面对两端轴颈有较高的位置精度要求，且外圆的表面粗糙度 Ra 值为 0.8~0.4μm，此外，该传动轴与一般重要的轴类零件一样，为了获得良好的综合力学性能，需要进行调质处理。

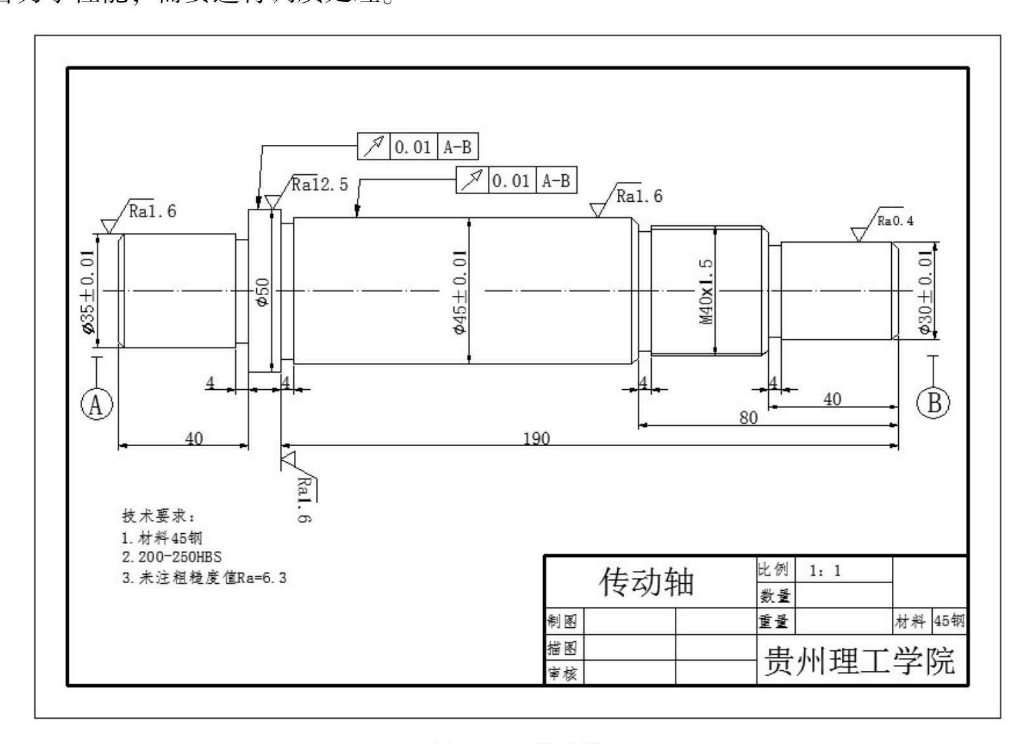


图 8－7　传动轴

根据传动轴的精度要求和力学性能要求，可确定加工顺序为：粗车—调质一半精车一磨削由于粗车时加工余量多，切削力较大，且粗车时各加工面的位置精度要求低，故采用一夹一顶安装工件。如车床上主轴孔较小，粗车 φ35 一端时也可只用三爪自定心卡盘装夹粗车后的 φ45 外圆；半精车时，为保证各加工面的位置精度，以及与磨削采用统一的定位基准，减少重复定位误差，使磨削余量均匀．保证磨削加工质量，故采用两顶尖安装工件。

传动轴的加工工艺过程如表 8－4 所示。

表 8-4　传动轴加工工艺

序号	工种	加工简图	加工内容	刀具或工具	安装方法
1	下料		下料 $\Phi55\times245$		
2	车	$\phi52$ $\phi45$ $\phi40$ $\phi30$ 39 79 189 202	夹持 $\Phi55$ 外圆：车端面见平，钻中心孔 $\Phi2.5$；用尾座顶尖顶住工件粗车外圆 $\Phi52\times202$；粗车 $\Phi45$、$\Phi40$、$\Phi30$ 各外圆；直径留量 2mm 长度留量 1mm	中心钻 右偏刀	三爪自定心卡盘顶尖
3	车	39	夹持 $\Phi47$ 外圆：车另一端面，保证总长 240；钻中心孔 $\Phi2.5$；粗车 $\Phi35$ 外圆，直径留量 2mm，长度留量 1mm	中心钻 右偏刀	三爪自定心卡盘
4	热处理		调质 220~250HBS	钳子	
5	车		修研中心孔	四棱顶尖	三爪卡盘
6	车	40	用卡箍卡 B 端： 精车 $\Phi50$ 外圆至尺寸； 精车 $\Phi35$ 外圆至尺寸； 切槽，保长度 40； 倒角	右偏刀 切槽刀	双顶尖
7	车	190 80 40	用卡箍卡 A 端： 精车 $\Phi45$ 外圆至尺寸； 精车 M40 大径为 $\Phi40_{-0.2}^{-0.1}$ 外圆至尺寸； 精车 $\Phi30$ 外圆至尺寸； 切槽三个，分别保长度 190、80 和 40；倒角三个； 车螺纹 M40×1.5	右偏刀 切槽刀 螺纹刀	双顶尖
8	磨		外圆磨床，磨 $\Phi30$、$\Phi45$ 外圆	砂轮	双顶尖

8.3.2　盘套类零件车削工艺

盘套类零件主要由孔、外圆与端面所组成。除尺寸精度、表面粗糙度有要求外，其外圆对孔有径向圆跳动的要求，端面对孔有端面圆跳动的要求。保证径向圆跳动和端面圆跳动是制定盘套类零件的工艺要重点考虑的问题。在工艺上一般分粗车和精车。精车时，尽可能把有位置精度要求的外圆、孔、端面在一次安装中全部加工完。若有

位置精度要求的表面不可能在一次安装中完成时，通常先把孔做出，然后以孔定位上心轴加工外圆或端面（有条件也可在平面磨床上磨削端面）。其安装方法和特点参看用心轴安装工件部分。图 8－8 为盘套类齿轮坯的零件图，其加工顺序如表 8－5 所示。

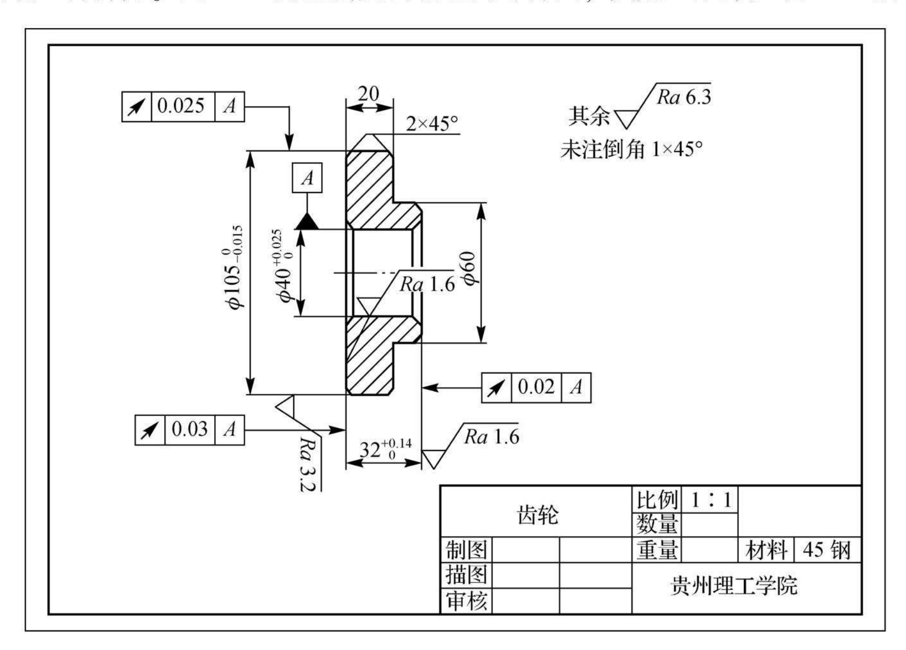


图 8－8　盘套类齿轮零件图

表 8－5　盘套类齿轮加工工艺

加工顺序	加工简图	加工内容	安装方法
1		下料 Φ110×36	
2		卡 Φ110 外圆，长 20 车端面见平 车外圆 Φ63×10	三爪
3		卡 Φ63 外圆 粗车端面见平，外圆至 Φ107 钻孔 Φ36 粗精镗孔 Φ40 至尺寸 精车端面、保证总长 33 精车外圆 Φ105 至尺寸 倒内角 1×45、外角 2×45	三爪
4		卡 Φ105 外圆、缠铜皮、找正 精车台肩面保证长度 20 车小端面、总长 32. 3 精车外园 Φ60 至尺寸 倒内角 1×45、外角 1×45、2×45	三爪

续表

加工顺序	加工简图	加工内容	安装方法
5		精车小端面 保证总长 32	顶尖 卡箍 锥度心轴

8.4　普通车床操作与加工实例

8.4.1　普通车床的操作

1. 普通车床操作规程

（1）操作前要紧身防护服，袖口扣紧，上衣下摆不能敞开，严禁戴手套，不得在开动的机床旁穿、脱换衣服，或围布于身上，防止机器绞伤。长头发操作者必须戴好安全帽，辫子应放入帽内，不得穿裙子、拖鞋。要戴好防护镜，以防铁屑飞溅伤眼。

（2）车床开动前，必须按照安全操作的要求，正确穿戴好劳动保护用品，必须认真仔细检查机床各部件和防护装置是否完好，安全可靠，加油润滑机床，并作低速空载运行 2~3 分钟，检查机床运转是否正常。

（3）装卸卡盘和大件时，要检查周围有无障碍物，垫好木板，以保护床面，并要卡住、顶牢、架好，车偏重物时要按轻重搞好平衡，工件及工具的装夹要紧固，以防工件或工具从夹具中飞出，卡盘扳手、套筒扳手要拿下。

（4）机床运转时，严禁戴手套操作；严禁用手触摸机床的旋转部分；严禁在车床运转中隔着车床传送物件。装卸工件，安装刀具，加油以及打扫切屑，均应停车进行。清除铁屑应用刷子或钩子，禁止用手清理。

（5）机床运转时，不准测量工件，不准用手去刹转动的卡盘；用砂纸时，应放在锉刀上，严禁戴手套用砂纸操作，磨破的砂纸不准使用，不准使用无柄锉刀，不得用正反车电闸作刹车，应经中间刹车过程。

（6）加工工件按机床技术要求选择切削用量，以免机床过载造成意外事故。

（7）加工切削时，停车时应将刀退出。切削长轴类须使用中心架，防止工件弯曲变形伤人；伸入床头的棒料长度不超过床头立轴之外，并慢车加工，伸出时应注意防护。

（8）高速切削时，应有防护罩，工件、工具的固定要牢固，当铁屑飞溅严重时，应在机床周围安装挡板使之与操作区隔离。

（9）机床运转时，操作者不能离开机床，发现机床运转不正常时，应立即停车，当突然停电时，要立即关闭机床，并将刀具退出工作部位。

（10）工作时必须侧身站在操作位置，禁止身体正面对着转动的工件。

（11）工作结束时，应切断机床电源或总电源，将刀具和工件从工作部位退出，清理安放好所使用的工、夹、量具，并清扫机床。

2. 普通车床的操作步骤

（1）打开空气开关，接通机床总电源

根据普通车床的总体布线，选择需要操作机床的空气开关，将开关置于打开状态；将车床左边红色旋钮的总电源开关顺时针方向旋转约25°，接通机床总电源。

（2）检查机床面板

接通机床总电源以后，检查机床面板相关旋钮的位置（如转速旋钮、自动走刀速度控制旋钮和切向旋钮等），若旋钮位置不满足车削加工要求，调整相应的旋钮以达到车削转速、切削进给速度等要求。

（3）装夹工件

普通车床装夹工件时，一定要保证夹紧工件（有效的做法是将三抓卡盘上三个装夹位置都通夹一遍），伸出段长度达到相应要求。夹紧后，立即取下卡盘扳手，以防意外事故的发生。

（4）装夹刀具

根据车削的需要及顺序，选择车削用刀具，并将刀具装夹在刀架上。装夹时，车刀的刀尖要与工件中心等高（为了有利于切削，一般取刀尖略高于中心）。

（5）启动主轴

当需要正转切削时，将机床的启动手柄向上提起一个档位，主轴正传。控制刀架移动进行切削；当需要反转切削时，将机床的启动手柄向下压一个档位，主轴反传。控制刀架移动进行切削；启动手柄处于中间位置时，主轴停止转动。

（6）正式切削

按照零件的工艺步骤进行切削加工。

（7）切削结束后，取下加工完毕的零件。

（8）断开机床电源。

（9）打扫卫生，将溜板箱移至机床尾部，按要求润滑机床，断开总电源。

8.4.2　典型零件的车削加工实例

1. 传动轴的车削加工操作步骤

传动轴的车削加工按前述车削工艺进行，传动轴零件图如图8－7所示，传动轴的具体加工操作步骤如下。

（1）将用卡盘扳手插入到三爪卡盘的方形孔内，顺时针（逆时针）旋转扳手使三爪卡盘的三个卡爪所围成的直径略大于毛坯直径，将毛坯塞入孔内，伸出端长度约30mm，采用90°外圆车刀车平端面；利用尾座上的中心钻钻中心孔；停止主轴，利用卡盘扳手松开卡爪，将毛坯向外沿轴线移动（伸出端长度 d，$210<d<215$），反向旋转卡盘扳手轻夹工件，将顶尖移至中心孔内并顶紧，锁紧尾座；利用卡盘扳手旋转使得卡爪夹紧工件；粗车外圆 $\Phi52\times202$；粗车、$\Phi40$、$\Phi30$ 各外圆；直径留余量2mm，长度留量1mm。

（2）掉头装夹，夹持 $\Phi47$ 外圆（设计尺寸为 $\Phi45$ 粗车后的外圆面）；利用右偏刀车另一端面，保证总长240；钻中心孔 $\Phi2.5$；粗车 $\Phi35$ 外圆，直径留量2mm，长度留量1mm。

（3）调质220~250HBS。具体操作步骤（略）。

（4）修研中心孔具体操作步骤（略）。

（5）用卡箍卡 B 端：精车 $\Phi50$ 外圆至尺寸；精车 $\Phi35$ 外圆至尺寸；切槽，保长度 40；倒角。

（6）用卡箍卡 A 端：精车 $\Phi45$ 外圆至尺寸；精车 M40 大径为 $\Phi40_{-0.2}^{-0.1}$外圆至尺寸；精车 $\Phi30$ 外圆至尺寸；切槽三个，分别保长度 190、80 和 40；倒角三个；车螺纹 M40 ×1.5。

（7）将上述步骤做完后的零件装夹到外圆磨床上，磨 $\Phi30$、$\Phi45$ 外圆，使零件的精度及尺寸达到图纸要求，结束加工。

2. 榔头手柄的加工实例：

榔头手柄零件图如图 8－9 所示。

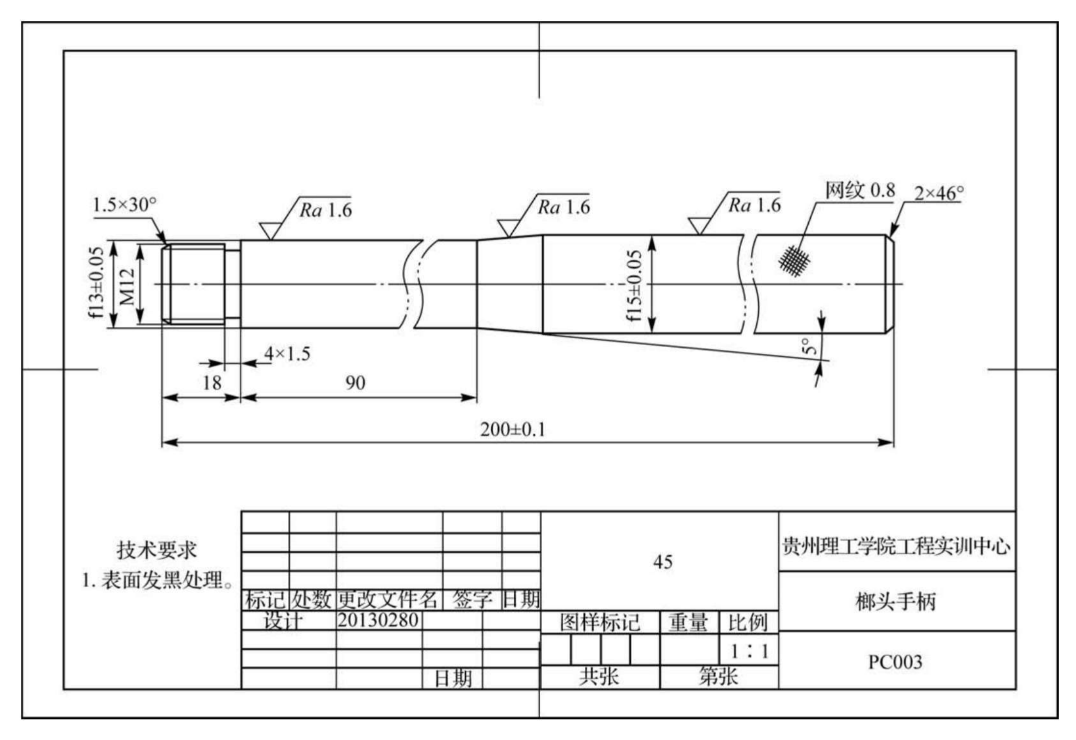


图 8－9　榔头手柄零件图

1. 榔头手柄的车削工艺：榔头手柄的车削工艺如表 8－6 所示

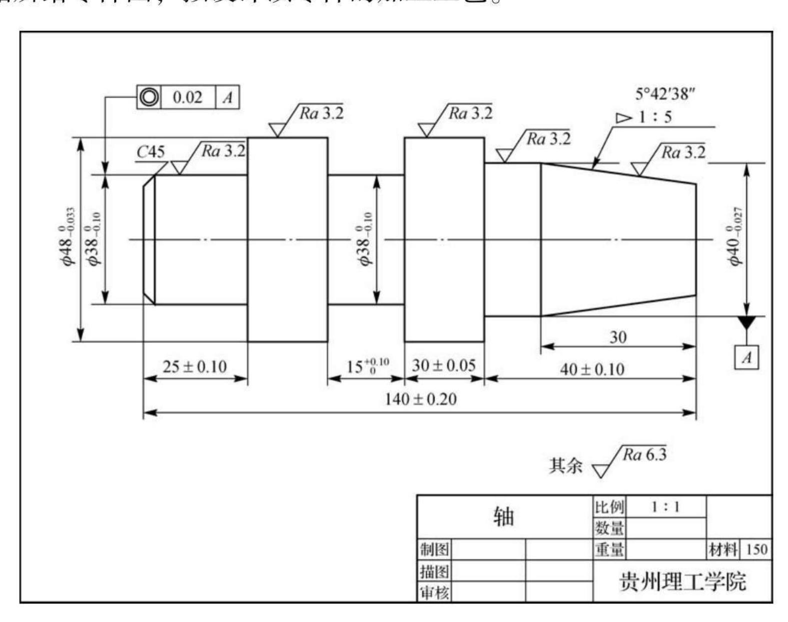
2. 榔头手柄的车削加工（略）

表 8-6 榔头靶的车削工艺

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">贵州理工学院工程实训中心</td><td colspan="3" rowspan="2">机械加工工艺过程卡片</td><td colspan="3">零件图号</td><td>PC003</td></tr>
<tr><td colspan="3">零件名称</td><td>榔头手柄</td></tr>
<tr><td>材料牌号</td><td>45</td><td>毛坯种类</td><td>圆钢</td><td>毛坯外形尺寸</td><td colspan="4">Φ17</td></tr>
<tr><td>工序号</td><td colspan="4">工序内容</td><td>车间</td><td>设备</td><td colspan="2">工艺装备</td></tr>
<tr><td>00</td><td colspan="4">车端面，打中心孔</td><td>普车</td><td>C6132A 车床</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>05</td><td colspan="4">粗（留 0.3）、精车零件至 $\Phi15$，长 210</td><td>普车</td><td>C6132A 车床</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>10</td><td colspan="4">粗（留 0.3）、精车 $\Phi13$ 外圆，长 108</td><td>普车</td><td>C6132A 车床</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>20</td><td colspan="4">车 M12 螺纹外圆，直径至 $\Phi11.6\pm0.05$，长 18</td><td>普车</td><td>C6132A 车床</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>30</td><td colspan="4">车 5°锥面成</td><td>普车</td><td>C6132A 车床</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>40</td><td colspan="4">车退刀槽</td><td>普车</td><td>C6132A 车床</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>50</td><td colspan="4">车 1.5×45°倒角</td><td>普车</td><td>C6132A 车床</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>60</td><td colspan="4">车 M12 螺纹</td><td>普车</td><td>C6132A 车床</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>70</td><td colspan="4">滚花</td><td>普车</td><td>C6132A 车床</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>80</td><td colspan="4">切断，长 200.5</td><td>普车</td><td>C6132A 车床</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>90</td><td colspan="4">调头车端面、2×45°倒角</td><td>普车</td><td>C6132A 车床</td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

思考题

1. 车刀刀具材料需要具备哪些性能？
2. 车削用量有哪些？
3. 普通车床加工对象有哪些？
4. 根据所给零件图，拟设计该零件的加工工艺。





第9章 钳　　工

教学目的和要求：钳工主要利用台虎钳、手用工具和一些机械工具完成某些零件的加工，部件、机器的装配和调试，以及各类机械设备的维护、修理等任务。本章采用理论加实际的教学方法，使学生了解钳工在零件加工、机械装配及维修中的作用、特点和应用，能正确使用钳工常见的工、量具，初步掌握钳工的基本操作要领（划线、錾削、锯削、锉削、钻孔、攻螺纹、套螺纹），并能按照图纸独立加工简单的零件，熟悉装配的概念及简单部件的拆装方法，完成简单部件的拆装工作。



9.1 概　　述

钳工是主要以手持工具对金属进行切削加工的方法。钳工操作主要是在钳工台和虎钳上进行。如图9-1所示，虎钳是夹持工件的主要工具，其规格大小用钳口的宽度表示，常用的为100~150mm。

钳工的基本操作有划线、錾削、锯削、锉削、刮削、研磨、钻孔、扩孔、铰孔、攻螺纹、套螺纹、矫正和弯曲、装配和拆卸等。

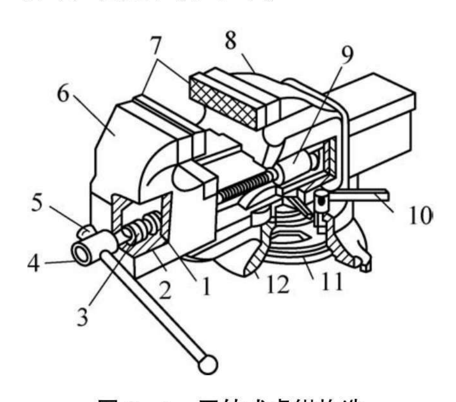


图9-1　回转式虎钳构造

1—固定部分；2—活动部分；3—弹簧；4—螺杆；5—手柄；6—挡圈；7—钳口；8—螺钉；9—螺母；10—转盘锁紧手柄；11—夹紧盘；12—转盘座

钳工的工作范围主要如下。

（1）用钳工工具进行修配及小批量零件的加工。

（2）精度较高的样板及模具的制作。

（3）整机产品的装配和调试。

（4）机器设备（或产品）使用中的调试和维修。



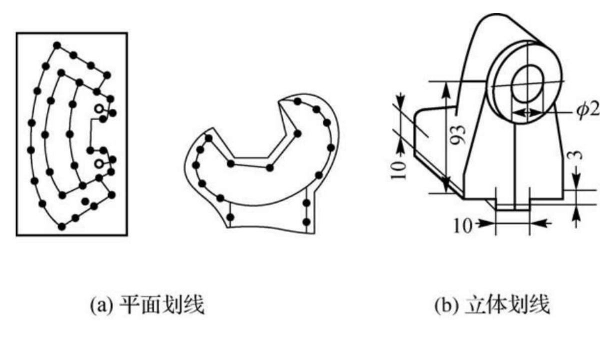
9.2 划线、錾削、锯削和锉削

划线、錾削、锯削及锉削是钳工中主要的工序，是机器维修装配时不可缺少的钳工基本操作。

9.2.1 划线

根据图样要求在毛坯或半成品上划出加工图形、加工界限或加工时找正用的辅助线称为划线。

划线分平面划线和立体划线两种，如图 9-2 所示。平面划线是在零件的一个平面或几个互相平行的平面上划线。立体划线是在工作的几个互相垂直或倾斜平面上划线。



(a) 平面划线　　(b) 立体划线

图 9-2　划线的种类

划线的目的：

（1）划出清晰的尺寸界线以及尺寸与基准间的相互关系，既便于零件在机床上找正、定位，又使机械加工有明确的标志。

（2）检查毛坯的形状与尺寸，及时发现和剔除不合格的毛坯。

（3）通过对加工余量的合理调整分配（即划线“借料”的方法），使零件加工符合要求。

1. 划线工具

1）划线平台

划线平台又称划线平板，用铸铁制成，它的上平面经过精刨或刮削，是划线的基准平面。

2）划针、划线盘与划规

划针是在零件上直接划出线条的工具。如图 9-3 所示，由工具钢淬硬后将尖端磨锐或焊上硬质合金尖头。弯头划针可用于直线划针划不到的地方和找正零件。使用划针划线时必须使针尖紧贴钢直尺或样板。　　划线盘如图 9-4 所示，它的直针尖端焊上硬质合金，用来划与针盘平行的直线。另一端弯头针尖用来找正零件用。

常用划规如图 9-5 所示。它适合在毛坯或半成品上划圆。

此外常用于划线的工具还有量高尺、高度游标尺、直角尺等。

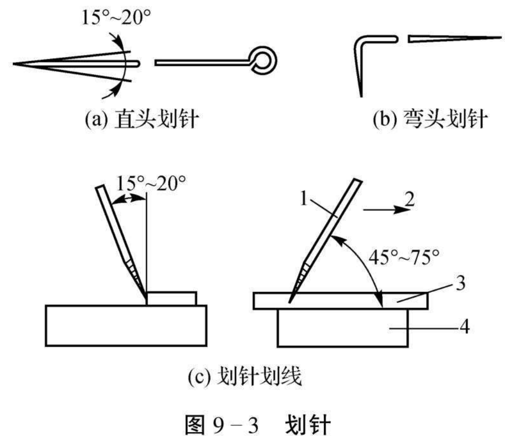


图9-3　划针

1—划针；2—划线方向；3—钢直尺；4—零件

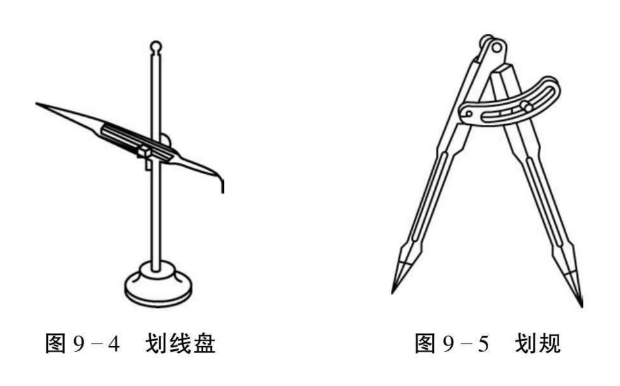


图9-4　划线盘　　图9-5　划规

4）支承用的工具和样冲

（1）方箱　如图9-6所示，是用灰铸铁制成的空心长方体或立方体。它的6个面均经过精加工，相对的平面互相平行，相邻的平面互相垂直。方箱用于支承划线的零件。

（2）V形铁　如图9-7所示，主要用于安放轴、套筒等圆形零件。一般V形铁都是两块一副，即平面与V形槽是在一次安装中加工的。V形槽夹角为90°或120°。

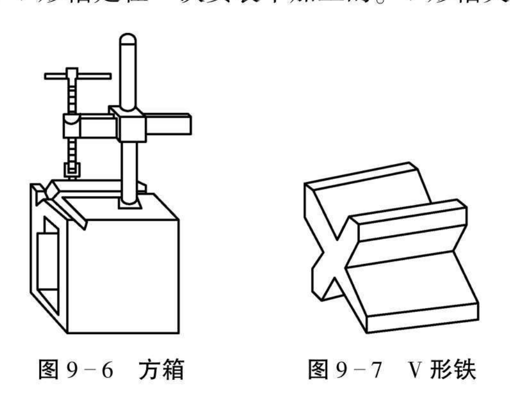


图9-6　方箱　　图9-7　V形铁

（3）千斤顶　如图9-8所示，常用于支承毛坯或形状复杂的大零件划线。使用

时，三个一组顶起零件，调整顶杆的高度便能方便地找正零件。

（4）样冲　如图9－9所示，用工具钢制成并经淬硬。样冲用于划好的线条上打出小而均匀的样冲眼，以免零件上已划好的线在搬运、装夹过程中因碰、擦而模糊不清，影响加工。

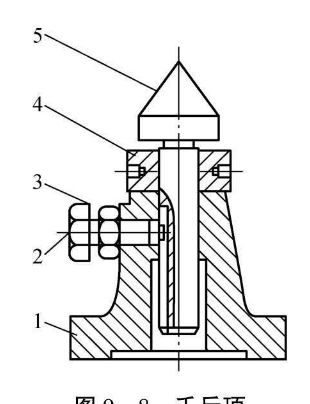


图9－8　千斤顶

1—底座；2—导向螺钉；3—锁紧螺母；4—圆螺母；5—顶杆

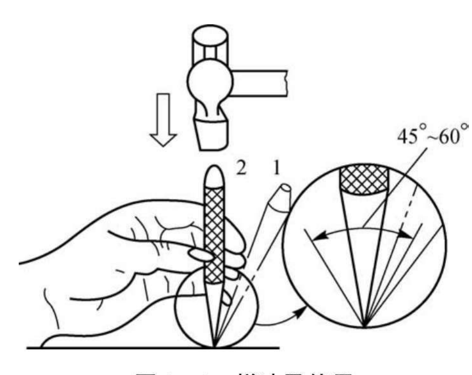


图9－9　样冲及使用

1—对准位置；2—打样冲眼

2. 划线方法与步骤

1）平面划线方法与步骤

平面划线的实质是平面几何作图问题。平面划线是用划线工具将图样按实物大小1∶1划到零件上去的。

（1）根据图样要求，选定划线基准。

（2）对零件进行划线前的准备（清理、检查、涂色，在零件孔中装中心塞块等）。在零件上划线部位涂上一层薄而均匀的涂料（即涂色），使划出的线条清晰可见。

（3）划出加工界限（直线、圆及连接圆弧）。

（4）在划出的线上打样冲眼。

2）立体划线方法与步骤

立体划线是平面划线的复合运用。它和平面划线有许多相同之处，如划线基准一经确定，其后的划线步骤大致相同。它们的不同之处在于一般平面划线应选择两个基准，而立体划线要选择三个基准。

9.2.2　錾削

1. 錾削工具及其使用

（1）錾子及其使用

常用的錾子有平錾、槽錾和油槽錾，如图9－10所示。平錾用于錾平面和錾金属，它的刃宽一般为10~15mm；槽錾用于錾槽，它的刃宽约为5mm；油槽錾用于錾油槽，它的錾刃磨成与油槽形状相符的圆弧形。

握錾子应轻松自如，主要用中指夹紧。錾头伸出约20~25mm，如图9－11所示。

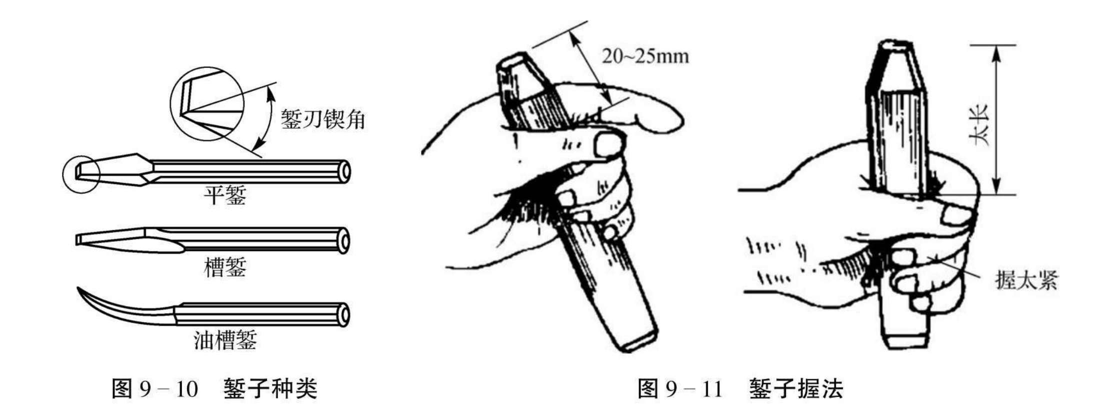


图 9－10　錾子种类　　　　图 9－11　錾子握法

（2）手锤及其握法

手锤大小用锤头的重量来表示，常用的约 0. 5kg，手锤全长约 300mm。

握手锤主要靠拇指和食指，其余各指仅在锤击下时才握紧，柄端伸出 15～30mm，如图 9－12 所示。

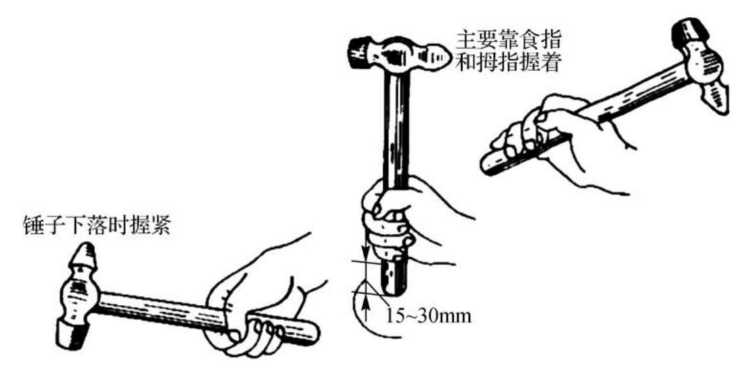


图 9－12　手锤及其握法

2. 錾削操作

錾削时姿势应便于用力，不易疲倦，挥锤要自然，眼睛应注视錾刃，如图 9－13 所示。



图 9－13　錾削姿势

起錾时应将錾子握平，以便于錾刃切入工件。錾削时，錾子与工件夹角如图 9 - 14 所示。粗錾时，錾刃表面与工件夹角 α 为 3°~5°；细錾时，α 角略大，操作时应根据实际效果随时调整 α 角。

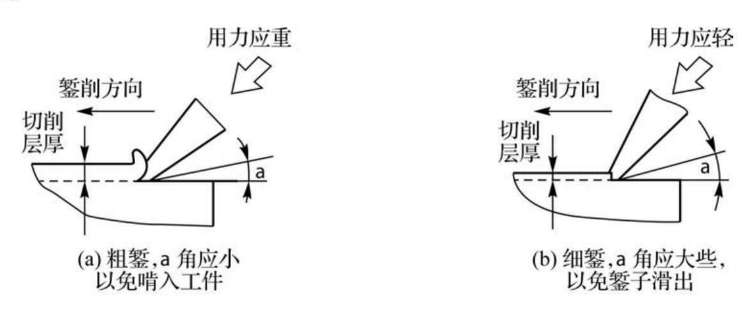


图 9 - 14　錾子与工件夹角

当錾削到靠近工件尽头时，应调转工件，从另一端錾掉剩余部分。

錾平面时，应先用槽錾开槽，如图 9 - 15（a）所示。槽间的宽度约为平錾錾刃宽度的 3/4，然后再用平錾錾平，如图 9 - 15（b）所示。为了易于錾削，平錾的錾刃应与前进方向成 45°角。

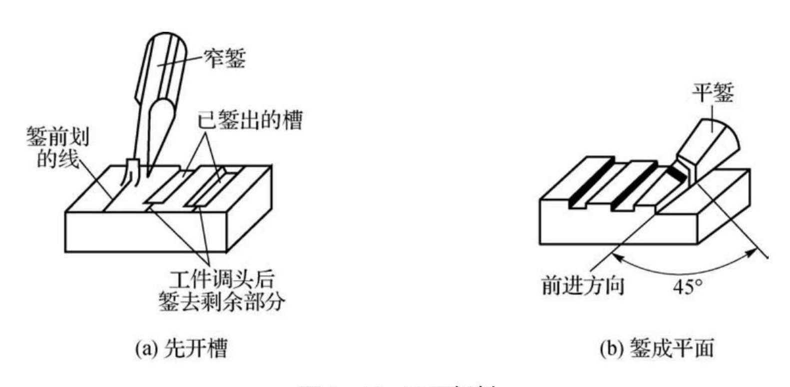


图 9 - 15　平面錾削

9.2.3　锯削

用手锯把原材料和零件割开，或在其上锯出沟槽的操作叫锯削。

1. 手锯

手锯由锯弓和锯条组成。

（1）锯弓

锯弓有固定式和可调式两种，如图 9 - 16 所示。

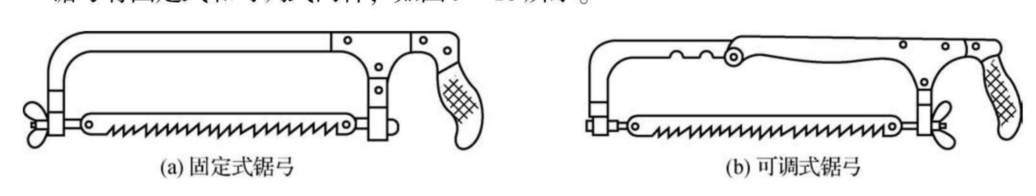


图 9 - 16　手锯

（2）锯条

锯条一般用工具钢或合金钢制成，并经淬火和低温回火处理。锯条按锯齿齿距分为粗齿、中齿、细齿三种。粗齿锯条适用锯削软材料和截面较大的零件。细齿锯条适用于锯削硬材料和薄壁零件。锯齿在制造时按一定的规律错开排列形成锯路。

2. 锯削操作要领

（1）锯条安装　安装锯条时，锯齿方向必须朝前，锯条绷紧程度要适当。

（2）握锯及锯削操作　一般握锯方法是右手握稳锯柄，左手轻扶弓架前端。锯削时站立位置如图 9－17 所示。锯削时推力和压力由右手控制，左手压力不要过大，主要应配合右手扶正锯弓，锯弓向前推出时加压力，回程时不加压力，在零件上轻轻滑过。锯削往复运动速度应控制在 40 次/min 左右。

锯削时最好使锯条全部长度参加切削，一般锯弓的往返长度不应小于锯条长度的 2/3。

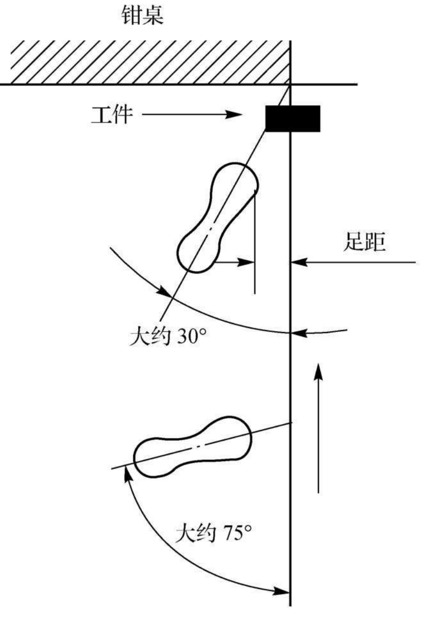


图 9－17　锯削时站立位置

9.2.4　锉削

用锉刀从零件表面锉掉多余的金属，使零件达到图样要求的尺寸、形状和表面粗糙度的操作叫锉削。锉削是钳工最基本的操作，是工件表面加工方法之一。

1. 锉刀

锉刀是锉削的主要工具，锉刀用高碳钢（T12、T13）制成，并经热处理淬硬至 62HRC ~67HRC。锉刀的构造及各部分名称如图 9－18 所示。

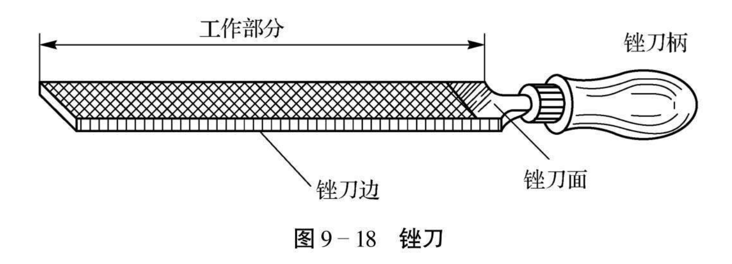


图 9－18　锉刀

锉刀按每 10mm 锉面上齿数的多少，分为粗锉刀、细锉刀和光锉刀三种。粗锉刀的齿间容屑槽较大，不易堵塞，适用于粗加工或锉削铜和铝等软金属；细锉刀多用于锉削钢材和铸铁；光锉刀又称油光锉，只适用于最后修光表面。

根据断面形状又可将锉刀分为：平锉、方锉、三角锉、圆锉、半圆锉，如图 9－19 所示。

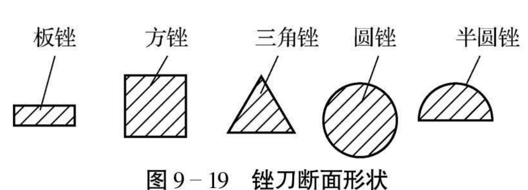
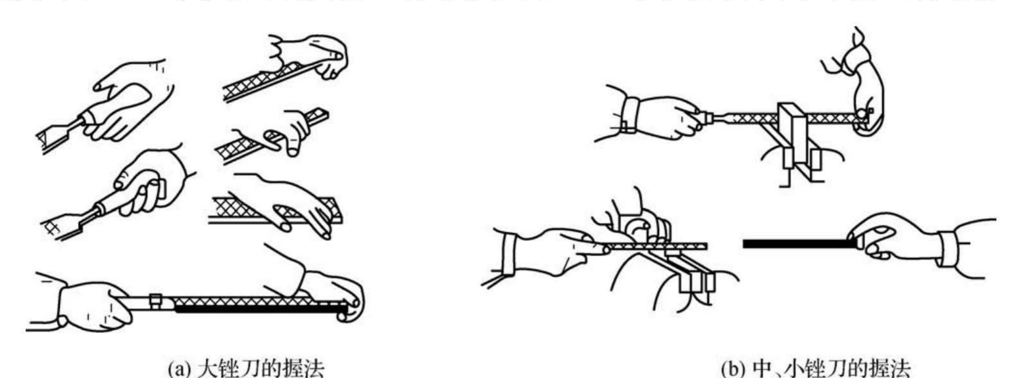


图 9－19　锉刀断面形状

2. 锉削操作要领

1）握锉锉刀的种类较多，规格、大小不一，使用场合也不同，故锉刀握法也应随之改变。如图 9－20（a）所示为大锉刀的握法。如图 9－20（b）所示为中、小锉刀的握法。

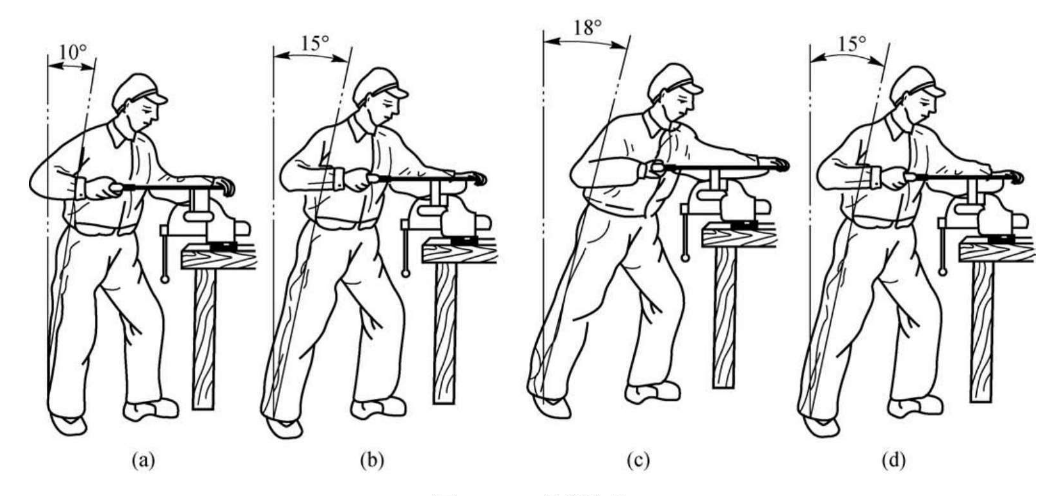


(a) 大锉刀的握法　(b) 中、小锉刀的握法

图 9－20　锉刀的握法

2）锉削姿势

锉削时人的站立位置与锯削相似，锉削操作姿势如图 9－21 所示，身体重量放在左脚，右膝要伸直，双脚始终站稳不移动，靠左膝的屈伸而作往复运动。开始时，身体向前倾斜 10°左右，右肘尽可能向后收缩如图 9－21（a）所示。在最初三分之一行程时，身体逐渐前倾至 15°左右，左膝稍弯曲如图 9－21（b）所示。其次三分之一行程，右肘向前推进，同时身体也逐渐前倾到 18°左右，如图 9－21（c）所示。最后三分之一行程，用右手腕将锉刀推进，身体随锉刀向前推的同时自然后退到 15°左右的位置上，如图 9－21（d）所示，锉削行程结束后，把锉刀略提起一些，身体姿势恢复到起始位置。



(a)　(b)　(c)　(d)

图 9－21　锉削姿势

3. 锉削方法

1）平面锉削

锉削平面的方法有 3 种。顺向锉法如图 9－22（a）所示。交叉锉法如图 9－22（b）所示。推锉法如图 9－22（c）所示。锉削平面时，锉刀要按一定方向进行锉削，并在锉削回

程时稍作平移，这样逐步将整个面锉平。

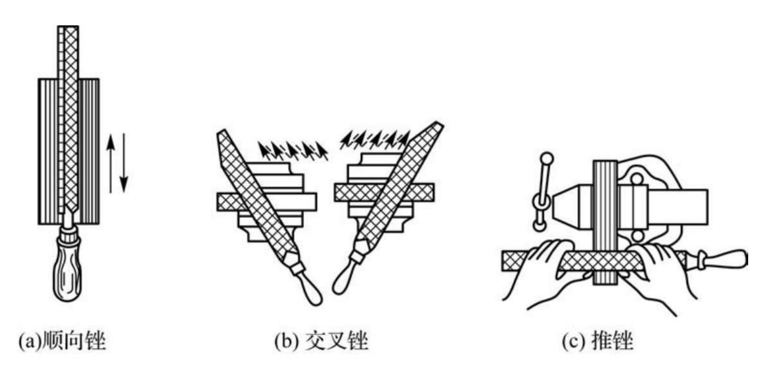


图 9－22　平面锉削方法

2）检验工具及其使用

检验工具有刀口形直尺、90°角尺、游标角度尺等。刀口形直尺、90°角尺可检验零件的直线度、平面度及垂直度。下面介绍用刀口形直尺检验零件平面度的方法。

（1）将刀口形直尺垂直紧靠在零件表面，并在纵向、横向和对角线方向逐次检查，如图 9－23 所示。

（2）检验时，如果刀口形直尺与零件平面透光微弱而均匀，则该零件平面度合格；如果透光强弱不一，则说明该零件平面凹凸不平。在刀口形直尺与零件紧靠处用塞尺插入，根据塞尺的厚度即可确定平面度的误差，如图 9－24 所示。

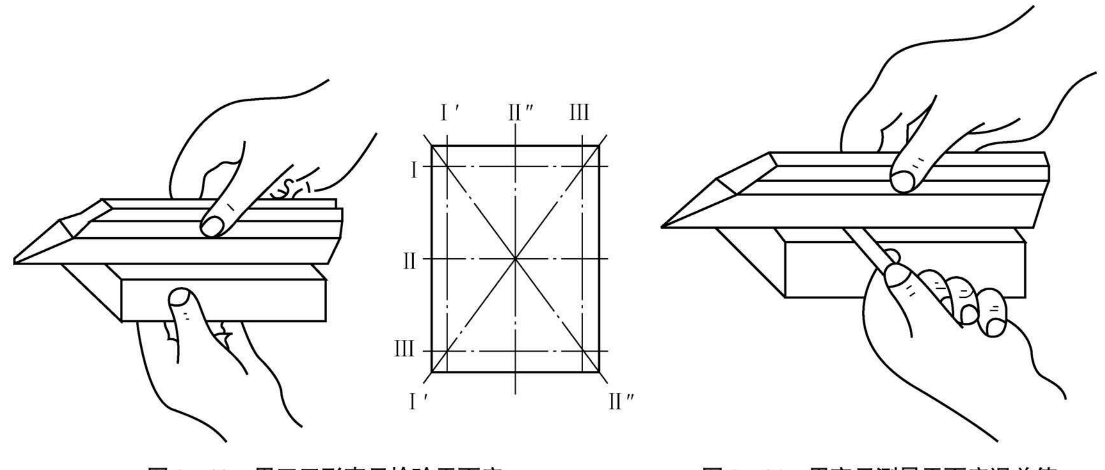


图 9－23　用刀口形直尺检验平面度　　图 9－24　用塞尺测量平面度误差值



9.3　钻孔、扩孔和铰孔

钳工加工孔的方法一般指钻孔、扩孔和铰孔。

9.3.1　钻孔

用钻头在实心零件上加工孔叫钻孔。

1. 钳工常用钻床

（1）台式钻床　如图 9－25（a）所示，它是一种小型机床，安放在钳工台上使用。其钻孔直径一般在 12mm 以下，主要用于加工小型工件上的各种孔，钳工中用得最多。

（2）立式钻床　如图 9－25（b）所示，一般用来钻中型工件上的孔，其规格用最大钻孔直径表示，常用的有 25mm、35mm、50mm 等几种。

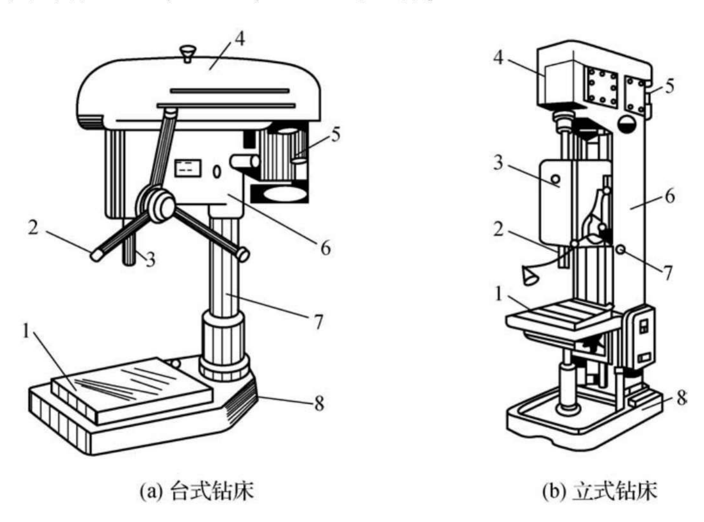


图 9－25　钻床

2. 麻花钻

麻花钻是钻孔的主要刀具，如图 9－26 所示。麻花钻用高速钢制成，工作部分经热处理淬硬至 62HRC～65HRC。麻花钻由钻柄、颈部和工作部分组成。直径小于 12mm 时一般为直柄钻头，大于 12mm 时一般为锥柄钻头。麻花钻有两条对称的螺旋槽，用来形成切削刃，且作输送切削液和排屑之用。

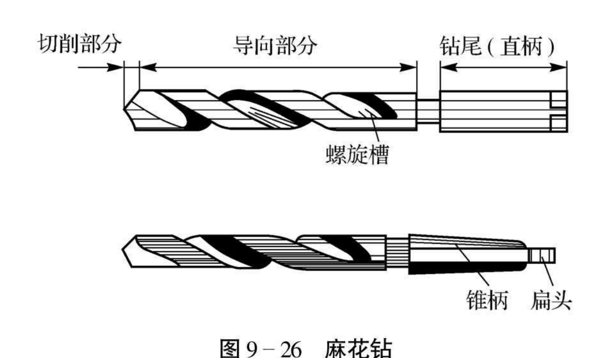
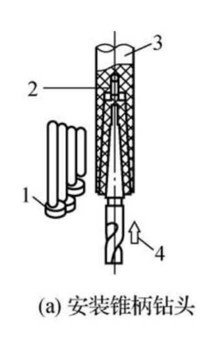


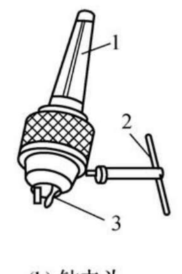
图 9－26　麻花钻

3. 钻头的装夹

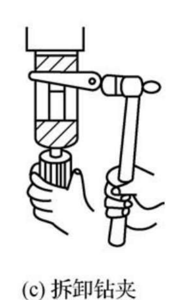
钻头的装夹方法，按其柄部的形状不同而异。锥柄钻头可以直接装入钻床主轴锥孔内，较小的钻头可用过渡套筒安装，如图 9－27（a）所示。直柄钻头用钻夹头安装，如图 9－27（b）所示。钻夹头（或过渡套筒）的拆卸方法是将楔铁插入钻床主轴侧边的扁孔内，左手握住钻夹头右手用锤子敲击楔铁卸下钻夹头，如图 9－27（c）所示。



(a) 安装锥柄钻头



(b) 钻夹头



(c) 拆卸钻夹

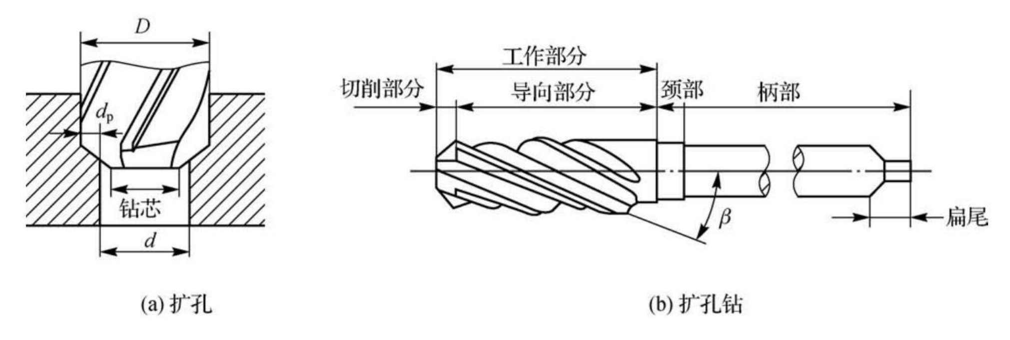
图 9-27　安装拆卸钻头

9.3.2　扩孔与铰孔

用扩孔钻或钻头扩大零件上原有的孔叫扩孔，如图 9-28（a）所示。孔径经钻孔、扩孔后，用铰刀对孔进行提高尺寸精度和表面质量的加工叫铰孔。

1. 扩孔

一般用麻花钻作扩孔钻扩孔（如图 9-28（b）所示）。扩孔尺寸公差等级可达到 IT9，表面粗糙度 Ra 值可到达 3.2μm。扩孔可作为终加工，也可作为铰孔前的预加工。



(a) 扩孔　　(b) 扩孔钻

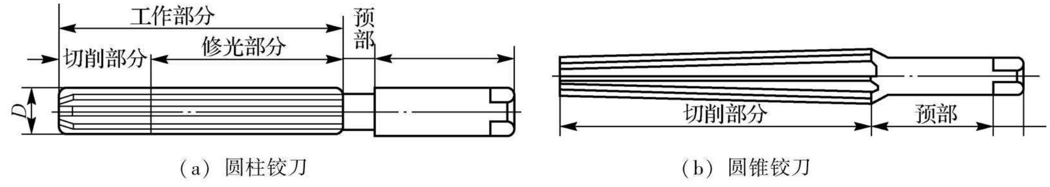
图 9-28　扩孔及扩孔钻

2. 铰孔

钳工常用手用铰刀进行铰孔，铰孔精度高（可达 IT9~IT6），表面粗糙度小（Ra 值为 1.6 μm~0.4 μm）。铰孔的加工余量较小，粗铰 0.15 mm~0.5 mm，精铰 0.05 mm~0.25 mm。

（1）铰刀　铰刀是孔的精加工刀具。铰刀分为机铰刀和手铰刀两种，机铰刀为锥柄，手铰刀为直柄。如图 9-29 所示为手铰刀。

（2）手铰孔方法　将铰刀插入孔内，两手握铰杠手柄，顺时针转动并稍加压力，使铰刀慢慢向孔内进给，注意两手用力要平衡，使铰刀铰削时始终保持与零件垂直。铰刀退出时，也应边顺时针转动边向外拔出。



（a）圆柱铰刀　　（b）圆锥铰刀

图 9-29　手铰刀



9.4　攻螺纹和套螺纹

常用的三角螺纹零件，除采用机械加工外，还可以用钳工攻螺纹和套螺纹的方法获得。

9.4.1　攻螺纹

攻螺纹是用丝锥加工出内螺纹。

1. 丝锥和绞杠

丝锥的结构如图 9－30 所示。其工作部分是一段开槽的外螺纹，丝锥的工作部分包括切削部分和校准部分。绞杠是扳转丝锥的工具，如图 9－31 所示。常用的是可调节式，以便夹持各种不同尺寸的丝锥。

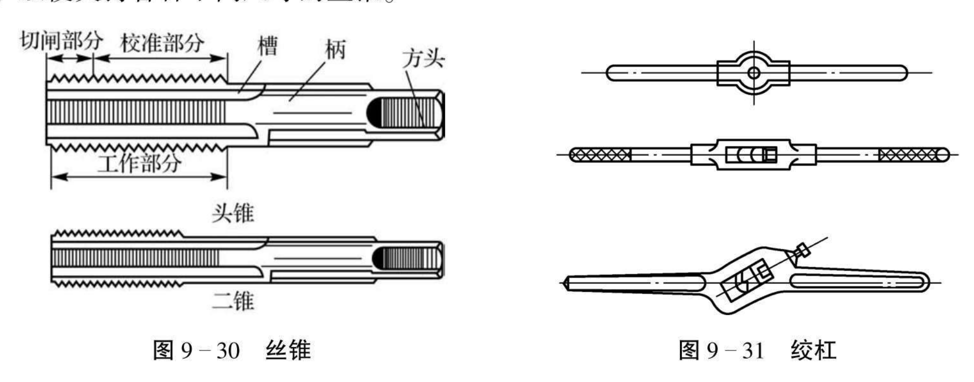


图 9－30　丝锥　　　　图 9－31　绞杠

2. 攻螺纹方法

（1）攻螺纹前的孔径 d（钻头直径）略大于螺纹底径。其选用丝锥尺寸可查表，也可按经验公式计算：

对于攻普通螺纹，

加工钢料及塑性金属时：$d=D-p$

加工铸铁及脆性金属时：$d=D-1.1p$

式中：D—螺纹基本尺寸；

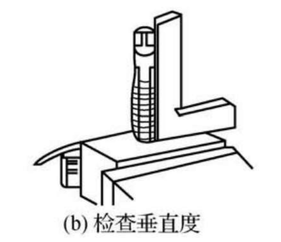
p—螺距。若孔为盲孔，由于丝锥不能攻到底，所以钻孔深度要大于螺纹长度，其尺寸按下式计算：

孔的深度＝螺纹长度$+0.7D$

（2）手工攻螺纹的方法，如图 9－32 所示。

双手转动铰手，并轴向加压力，当丝锥切入零件 1～2 牙时，用 90°角尺检查丝锥是否歪斜，如丝锥歪斜，要纠正后再往下攻。当丝锥位置与螺纹底孔端面垂直后，轴向就不再加压力。两手均匀用力，为避免切屑堵塞，要经常倒转 1/2 圈～1/4 圈，以达到断屑。头锥、二锥应依次攻入。攻铸铁材料螺纹时加煤油而不加切削液，钢件材料加切削液，以保证铰孔表面的粗糙度要求。


(a) 攻入孔内前的操作


(b) 检查垂直度

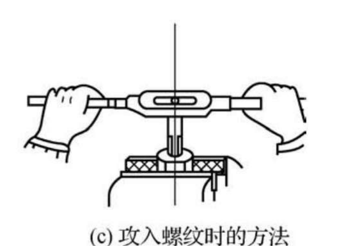

(c) 攻入螺纹时的方法

图 9 - 32 手工攻螺纹的方法

9.4.2 套螺纹

套螺纹是用板牙在圆杆上加工出外螺纹。

1. 套螺纹的工具

套螺纹用的工具是板牙和板牙架。板牙有固定的和开缝的两种。图 9 - 33 为开缝式板牙，其螺纹孔的大小可作微量的调节。套螺纹用的板牙架如图 9 - 34 所示。

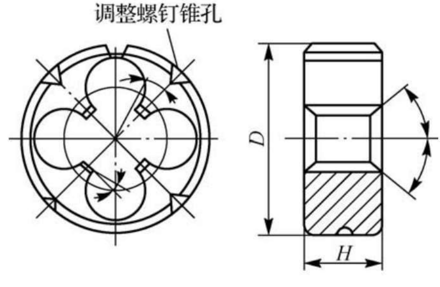


图 9 - 33 板牙

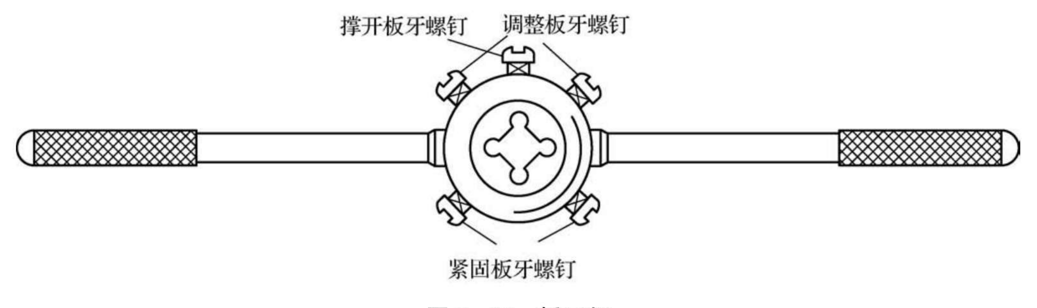


图 9 - 34 板牙架

2. 套螺纹方法

1）套螺纹前零件直径的确定

确定螺杆的直径可直接查表，也可按零件直径 $d=D-0.13p$ 的经验公式计算。

2）套螺纹操作

套螺纹的方法如图 9 - 35 所示，将板牙套在圆杆头部倒角处，并保持板牙与圆杆垂直，右手握住铰手的中间部分，加适当压力，左手将铰手的手柄顺时针方向转动，在板牙切入圆杆 2~3 牙时，应检查板牙是否歪斜，发现歪斜，应纠正后再套，当板牙位置正确后，再往下套就不加压力。套螺纹和攻螺纹一样，应经常倒转以切断切屑。套螺纹应加切削液，以保证螺纹的表面粗糙度要求。

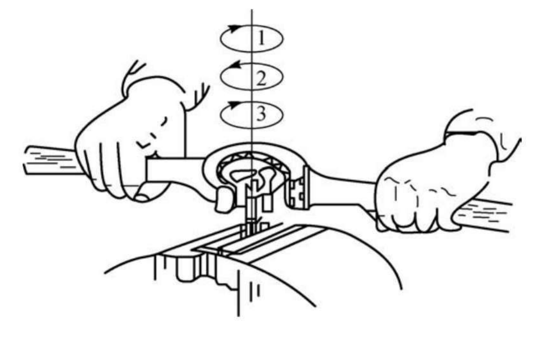


图 9 - 35 套螺纹



9.5 装配

装配是机器制造中的最后一道工序，它
是保证机器达到各项技术要求的关键。装配是钳工一项非常重要的工作。

9.5.1 装配概述

按照规定的技术要求，将零件组装成机器，并经过调整、试验，使之成为合格产品的工艺过程称为装配。

1. 装配的类型与装配过程

1）装配类型

装配类型一般可分为组件装配、部件装配和总装配。组件装配是将两个以上的零件连接组合成为组件的过程；部件装配是将组件、零件连接组合成独立机构（部件）的过程；总装配是将部件、组件和零件连接组合成为整台机器的过程。

2）装配过程

机器的装配过程一般由三个阶段组成：一是装配前的准备阶段，二是装配阶段（部件装配和总装配），三是调整、检验和试车阶段。装配过程一般是先下后上，先内后外，先难后易，先装配保证机器精度的部分，后装配一般部分。

2. 零、部件连接类型

组成机器的零、部件的连接形式很多，基本上可归纳成两类：固定连接和活动连接。每一类的连接中，按照零件结合后能否拆卸又分为可拆连接和不可拆连接，如表9－1所示。

表 9－1　机器零、部件连接形式

固定连接		活动连接	
可拆	不可拆	可拆	不可拆
螺纹、键、销等	铆接、焊接、压合、胶合等	轴与轴承、丝杠与螺母、柱塞与套筒等	活动连接的铆合头

3. 装配前的准备工作

装配前必须认真做好以下几点准备工作。

（1）研究和熟悉产品图样，了解产品结构以及零件作用和相互连接关系，掌握其技术要求。

（2）确定装配方法、程序和所需的工具。

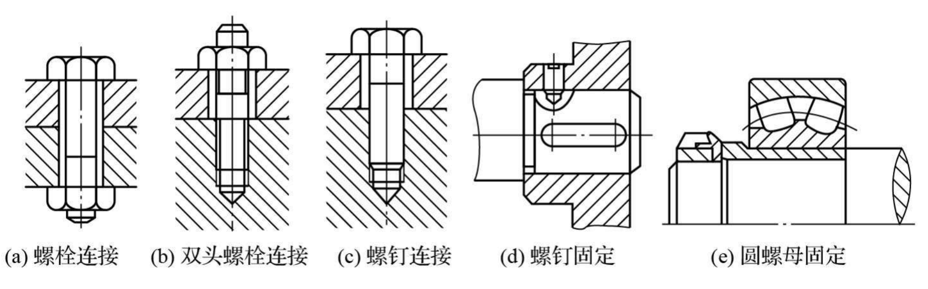
（3）备齐零件，进行清洗、涂防护润滑油。

9.5.2 典型连接件装配方法

装配的形式很多，下面着重介绍螺纹连接、滚动轴承、齿轮等几种典型连接件的装配方法。

1. 螺纹连接

如图 9－36 所示，螺纹连接常用零件有螺钉、螺母、双头螺栓及各种专用螺纹等。螺纹连接是现代机械制造中用得最广泛的一种连接形式。它具有紧固可靠、装拆简便、调整和更换方便、宜于多次拆装等优点。



(a) 螺栓连接　(b) 双头螺栓连接　(c) 螺钉连接　(d) 螺钉固定　(e) 圆螺母固定

图 9－36　常见的螺纹连接类型

对于一般的螺纹连接可用普通扳手拧紧。而对于有规定预紧力要求的螺纹连接，为了保证规定的预紧力，常用测力扳手或其他限力扳手以控制扭矩，如图 9－37 所示。

在紧固成组螺钉、螺母时，为使固紧件的配合面上受力均匀，应按一定的顺序来拧紧。如图 9－38 所示为两种拧紧顺序的实例。按图中数字顺序拧紧，可避免被连接件的偏斜、翘曲和受力不均。而且每个螺钉或螺母不能一次就完全拧紧，应按顺序分 2~3 次才全部拧紧。

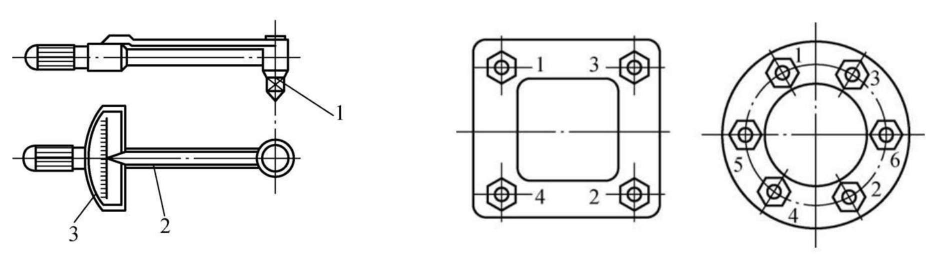


图 9－37　测力扳手

1—扳手头；2—指示针；3—读数板

图 9－38　拧紧成组螺母顺序

2. 滚动轴承的装配

滚动轴承的配合多数为较小的过盈配合，常用手锤或压力机采用压入法装配，为了使轴承圈受力均匀，采用垫套加压。轴承压到轴颈上时应施力于内圈端面，如图 9－39（a）所示；轴承压到座孔中时，要施力于外环端面上，如图 9－39（b）所示；若同时压到轴颈和座孔中时，整套应能同时对轴承内外端面施力，如图 9－39（c）所示。

轴承安装后要检查滚珠是否被咬住，是否有合理的间隙。

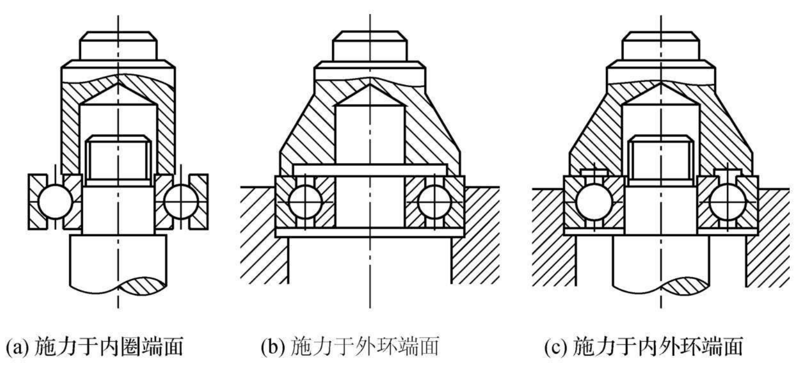
3. 齿轮的装配

齿轮装配的主要技术要求是保证齿轮传递运动的准确性、平稳性、轮齿表面接触斑点和齿侧间隙合乎要求等。

轮齿表面接触斑点可用涂色法检验。先在主动轮的工作齿面上涂上红丹，使相啮

合的齿轮在轻微制动下运转，然后看从动轮啮合齿面上接触斑点的位置和大小，如图 9－40 所示。

齿侧间隙一般可用塞尺插入齿侧间隙中检查。塞尺是由一套厚薄不同的钢片组成，每片的厚度都标在它的表面上。



(a) 施力于内圈端面　(b) 施力于外环端面　(c) 施力于内外环端面

图 9－39　滚动轴承的装配

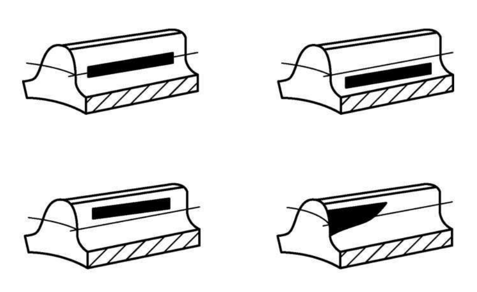


图 9－40　用涂色法检验啮合情况

9. 5. 3　部件装配和总装配

完成整台机器装配，必须经过部件装配和总装配过程。

1. 部件的装配

部件装配的过程包括以下四个阶段。

（1）装配前按图样检查零件的加工情况，根据需要进行补充加工。

（2）组合件的装配和零件相互试配。在这阶段内可用选配法或修配法来消除各种配合缺陷。组合件装好后不再分开，以便一起装入部件内。互相试配的零件，当缺陷消除后，仍要加以分开（因为它们不是属于同—个组合件），但分开后必须做好标记，以便重新装配时不会调错。

（3）部件的装配及调整。即按一定的次序将所有的组合件及零件互相连接起来，同时对某些零件通过调整正确地加以定位。通过这一阶段，对部件所提出的技术要求都应达到。

（4）部件的检验，即根据部件的专门用途做工作检验。如水泵要检验每分钟出水量及水头高度；齿轮箱要进行空载检验及负荷检验；有密封性要求的部件要进行水压（或气压）检验：高速转动部件还要进行动平衡检验等。只有通过检验确定合格的部

件，才可以进入总装配。

2. 总装配

总装配就是把预先装好的部件、组合件、其他零件，以及从市场采购来的配套装置或功能部件装配成机器。总装配过程及注意事项如下：

（1）总装前，必须了解所装机器的用途、构造、工作原理以及与此有关的技术要求。接着确定它的装配程序和必须检查的项目，最后对总装好的机器进行检查、调整、试验，直至机器合格。

（2）总装配执行装配工艺规程所规定的操作步骤，采用工艺规程所规定的装配工具。应按从里到外，从下到上，以不影响下道装配为原则的次序进行。操作中不能损伤零件的精度和表面粗糙度，对重要的复杂的部分要反复检查，以免搞错或多装、漏装零件。在任何情况下应保证污物不进入机器的部件、组合件或零件内。机器总装后，要在滑动和旋转部分加润滑油，以防运转时出现拉毛、咬住或烧损现象。最后要严格按照技术要求，逐项进行检查。

（3）装配好的机器必须加以调整和检验。调整的目的在于查明机器各部分的相互作用及各个机构工作的协调性。检验的目的是确定机器工作的正确性和可靠性，发现由于零件制造的质量、装配或调整的质量问题所造成的缺陷。小的缺陷可以在检验台上加以消除；大的缺陷应将机器送到原装配处返修。修理后再进行第二次检验，直至检验合格为止。

（4）检验结束后应对机器进行清洗，随后送修饰部门上防锈漆、涂漆。



9.6　钳工训练实例

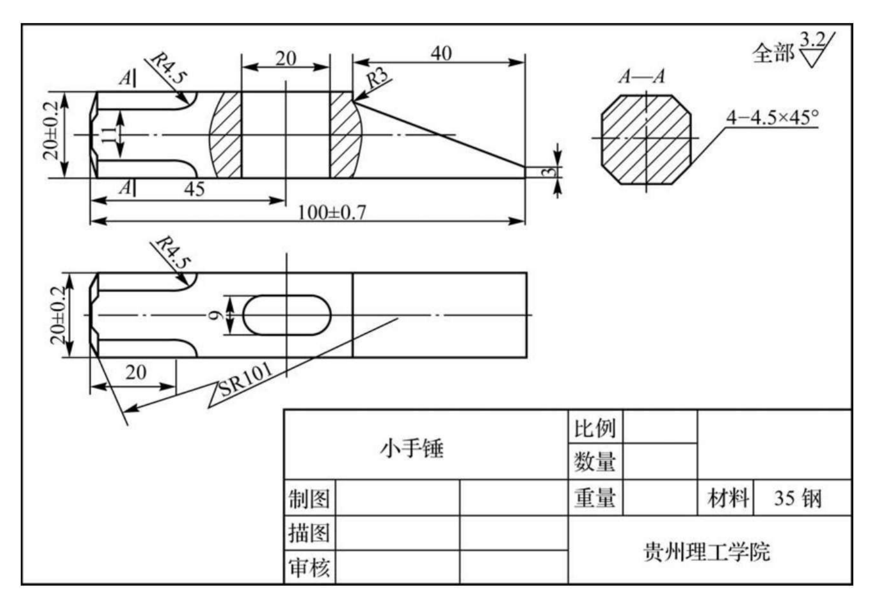


图 9－41　小手锤（材料：35 钢）

9.6.1 小手锤的制作

按照图纸要求（如图 9－41 所示），完成小手锤的制作。　　制作小手锤的操作步骤如表 9－2 所示。

表 9－2　制作小手锤操作步骤

单位：mm

操作序号	加工简图	加工内容	工具、量具
1. 备料	φ32 103	下料 材料：35 钢、φ32 棒料、长度 103	钢尺
2. 划线	22 22	划线 在 φ32 两端圆柱表面上划 22×22 的加工界限，并打上样冲眼	划线盘，直角尺，划针，手锤，样冲，高度游标尺
3. 錾削		錾削一个平面 要求錾削宽度不小于 20，平面度、垂直度 1.5	錾子，手锤、钢尺
4. 锯割		锯割三个面 要求锯痕整齐，尺寸不小于 20.5，各面平直，对边平行，邻边垂直	锯弓，锯条
5. 锉削		锉削六个面 要求各面平直，对边平行，邻边垂直，断面成正方形，尺寸 20+0.2	粗、中齿平锉刀，游标卡尺，直角尺
6. 划线		划线 按工件尺寸全部划出加工界限，并打样冲眼	划线盘，划针，划规，钢尺，样冲，手锤，高度游标尺
7. 锉削		锉削五个圆弧 圆弧半径符合图纸要求	圆锉
8. 锯割		锯割斜面 要求锯痕整齐	锯弓，锯条

续表

操作序号	加工简图	加工内容	工具、量具
9. 锉削	A 向视图 A	锉削四个圆弧面和一个球面 要求符合图纸要求	粗、中齿平锉刀
10. 钻孔		钻孔 用 φ9 钻头钻两孔	φ9 钻头
11. 锉削		锉通孔 用小方锉或小平锉锉掉留在两孔间的多余金属	小方锉或小平锉
12. 修光		修光 用细齿平锉刀和砂布修光各平面，用圆锉和砂布修光各圆弧面	细齿平锉刀，圆锉，砂布

思考题

1. 钳工的主要工作包括哪些？

2. 怎样正确采用顺向锉法、交叉锉法和推锉法？

3. 钻孔、扩孔与铰孔各有什么区别？

4. 在材料分别为 45 钢、铸铁的两个零件上加工 M10×1 的螺孔，其加工底孔应选多大直径的钻头，为什么？

5. 装配工艺包括哪些内容？



第10章　铣削加工

教学目的和要求：铣削加工是在铣床上利用铣刀的旋转（主运动）和零件的移动（进给运动）对零件进行切削加工的工艺过程，是一种生产率较高的平面、沟槽和成形面的加工方法。本章采用理论加实际的教学方法，使学生了解铣削加工的工艺特点及加工范围，了解铣削设备、附件、刀具、工具的性能及用途和使用方法，了解齿形加工方法，掌握铣床的操作技能，并能操作铣床按照图纸要求进行简单零件的铣削加工，培养学生的实践动手能力与工艺分析能力。



10.1　概　　述

铣削加工是机械制造业中重要的加工方法。铣削的加工范围广泛，可加工平面、台阶、斜面、沟槽、成型面、齿轮以及切断等，铣削加工的精度可达IT9~IT7，表面粗糙度 Ra 值为6.3~1.6μm。如图10-1所示为铣削加工常见的加工方式。由图可知，不论哪一种铣削方式，为完成铣削过程必须要有以下运动。

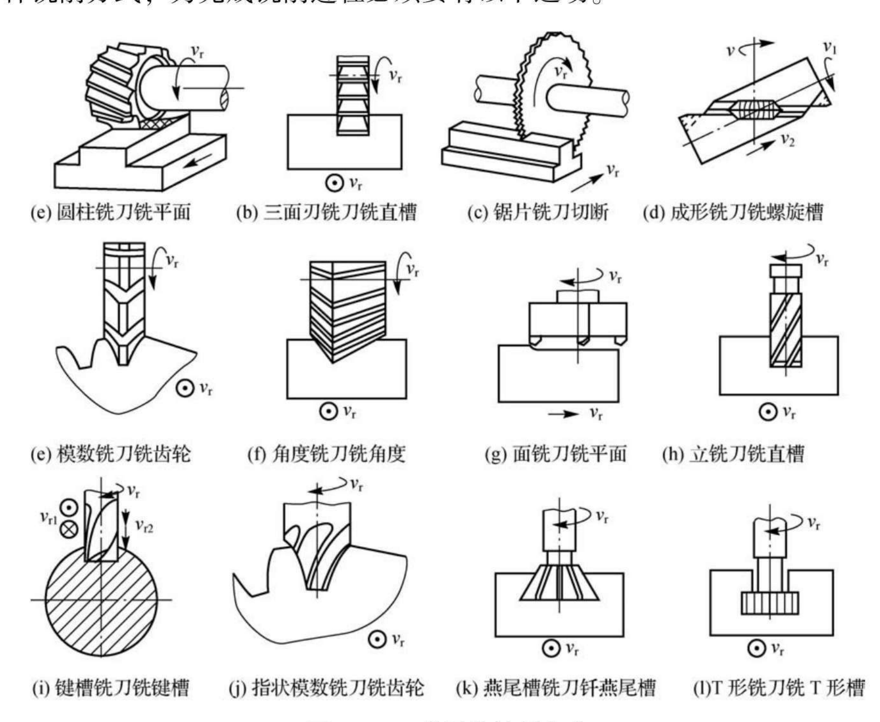


图10-1　常见的铣削方式

①铣刀的旋转——主运动（v_c）；

②工件随工作台缓慢的直线移动——进给运动（v_f）；

10.1.1　铣削加工的特点

（1）生产率高　铣刀是典型的多齿刀具，铣削时刀具同时参加工作的切削刃较多，可利用硬质合金镶片刀具，采用较大的切削用量，且切削运动是连续的，因此，与刨削相比，铣削生产效率较高。

（2）刀齿散热条件较好　铣削时，每个刀齿是间歇地进行切削，切削刃的散热条件好，但切入切出时热的变化及力的冲击，将加速刀具的磨损，甚至可能引起硬质合金刀片的碎裂。

（3）容易产生振动　由于铣刀刀齿不断切入切出，使铣削力不断变化，因而容易产生振动，这将限制铣削生产率和加工质量的进一步提高。

（4）加工成本较高　由于铣床结构较复杂，铣刀制造和刃磨比较困难，使得加工成本较高。

10.1.2　铣削用量

铣削时的铣削用量由铣削速度 v_c、进给量 f 和背吃刀量（又称铣削深度）a_p 和侧吃刀量（又称铣削宽度）a_e 四要素组成。

1）铣削速度 v_c

铣削速度即铣刀最大直径处的线速度，可由下式计算

$$v_c = \pi d_0 n / 1000 \ (\mathrm{m/min})$$

式中：d_0——铣刀直径（mm）；

n——铣刀转数（r/min）。

2）进给量 f

铣削时，工件在进给运动方向上相对刀具的移动量即为铣削时的进给量。由于铣刀为多刃刀具，计算时按单位时间不同，有以下三种度量方法。

①每齿进给量 f_z。其单位为毫米每齿（毫米/齿）。

②每转进给量 f。其单位为毫米每转（mm/r）。

③每分钟进给量 v_f。又称进给速度，其单位为毫米每分钟（mm/min）。

上述三者的关系为

$$v_f = f \cdot n = f_z \cdot Z \cdot n \ (\mathrm{mm/min})$$

一般铣床标牌上所指出的进给量为 v_f。

3）背吃刀量（铣削深度）a_p

如图10－2所示，背吃刀量为平行于铣刀轴线方向测量的切削层尺寸，单位为毫米（mm）。因周铣与面铣时相对于工件的方位不同，故 a_p 在图中标示也有所不同。

4）侧吃刀量（铣削宽度）a_e

它是垂直于铣刀轴线方向测量的切削层尺寸，单位为毫米（mm），如图10－2所示。

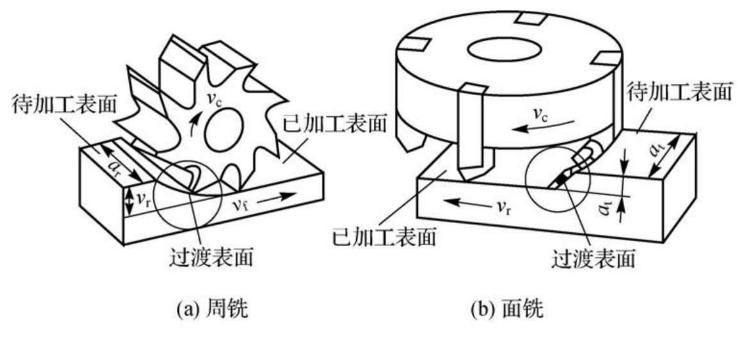


图 10－2　铣削运动和铣削要素



10.2　铣床及其附件

铣床的种类很多，最常见的是卧式（万能）铣床和立式铣床。两者的区别在于前者主轴为水平设置，后者主轴为竖直设置。

10.2.1　卧式万能铣床

卧式万能铣床是铣床中应用最多的一种。其主要特征是主轴轴线与工作台台面平行，即主轴轴线处于横卧位置，因此称卧铣。如图 10－3 所示为 X6132 卧式万能铣床外形图，在型号中，X 为机床类别代号，表示铣床，读作“铣”；6 为机床组别代号，表示卧式升降台铣床；1 为机床系别代号，表示万能升降台铣床；32 为主参数工作台面宽度的 1/10，即工作台面宽度为 320 mm。卧式万能升降台铣床的主要组成部分如下。

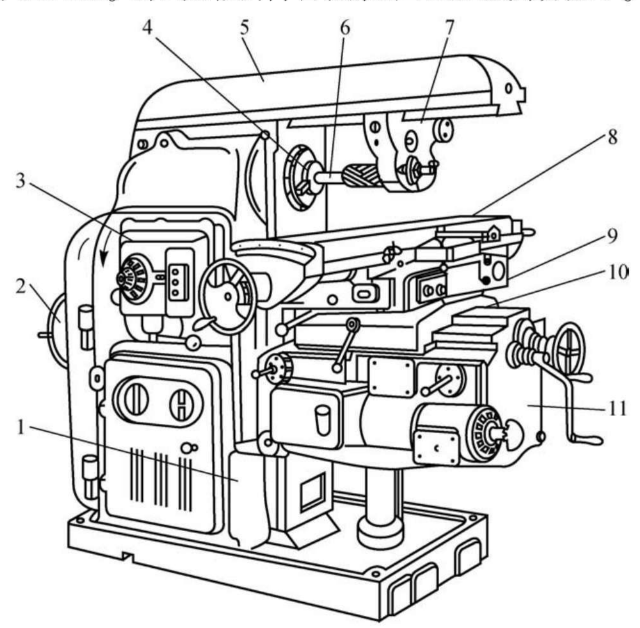


图 10－3　X6132 卧式万能升降台铣床示意图

1—床身；2—电动机；3—主轴变速机构；4—主轴；5—横梁；6—刀杆；7—吊架；8—纵向工作台；9—转台；10—横向工作台；11—升降台

（1）床身　床身支撑并连接各部件，顶面水平导轨支承横梁，前侧导轨供升降台移动之用，内部装有电动机、主轴变速机构和主轴等。

（2）横梁　横梁用于安装吊架，以便支撑刀杆外端，增强刀杆的刚性。横梁可沿床身的水平导轨移动，以适应不同长度的刀轴。

（3）主轴　主轴是空心轴，前端有 7∶24 的精密锥孔与刀杆的锥柄相配合，其作用是安装铣刀刀杆并带动铣刀旋转。

（4）纵向工作台　纵向工作台用于装夹夹具和零件，可在转台的导轨上由丝杠带动作纵向移动，以带动台面上的零件作纵向进给。

（5）横向工作台　横向工作台位于升降台上面的水平导轨上，可带动纵向工作台一起作横向进给。

（6）转台　转台位于纵、横工作台之间，它的作用是将纵向工作台在水平面内扳转一个角度（正、反均为 0°~45°），以便铣削螺旋槽等。

（7）升降台　升降台可使整个工作台沿床身的垂直导轨上下移动，以调整工作台面到铣刀的距离，并作垂直进给。升降台内部装置着供进给运动用的电动机及变速机构。

10.2.2　立式铣床

如图 10－4 所示为 X5032 立式铣床外形图。立式铣床与卧式铣床的主要区别是立式铣床主轴与工作台面垂直，此外，它没有横梁、吊架和转台。有时根据加工的需要，可以将主轴（立铣头）左、右倾斜一定的角度。铣削时铣刀安装在主轴上，由主轴带动做旋转运动，工作台带动零件作纵向、横向、垂向移动。

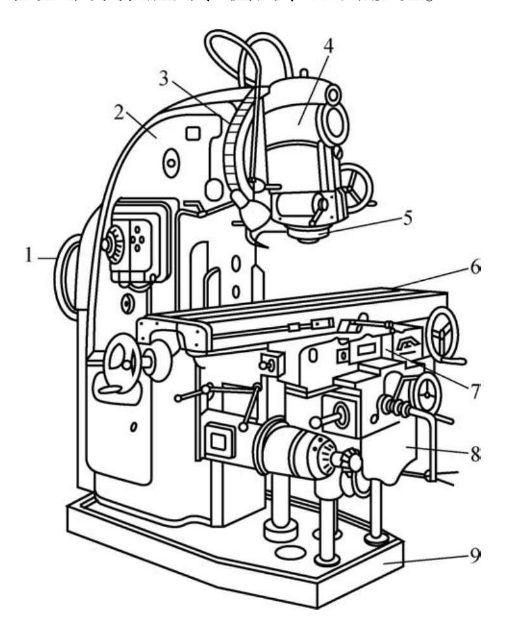


图 10－4　X5032 立式铣床示意图

1—电动机；2—床身；3—主轴头架旋转刻度；4—主轴头架；5—主轴；6—纵向工作台；7—横向工作台；8—升降台；9—底座

10.2.3 铣床附件

铣床的主要附件有机床用平口虎钳、回转工作台、分度头和万能铣头等。其中前3种附件用于安装零件，万能铣头用于安装刀具。当零件较大或形状特殊时，可以用压板、螺栓、垫铁和挡铁把零件直接固定在工作台上进行铣削。当生产批量较大时，可采用专用夹具或组合夹具安装零件，这样既能提高生产效率，又能保证零件的加工质量。

1. 机床用平口虎钳

机床用平口虎钳是一种通用夹具，也是铣床常用的附件之一，它安装使用方便，应用广泛。用于安装尺寸较小和形状简单的支架、盘套、板块、轴类零件。它有固定钳口和活动钳口，通过丝杠、螺母传动调整钳口间距离，以安装不同宽度的零件。铣削时，将平口虎钳固定在工作台上，再把零件安装在平口虎钳上，应使铣削力方向趋向固定钳口方向，如图10-5所示。

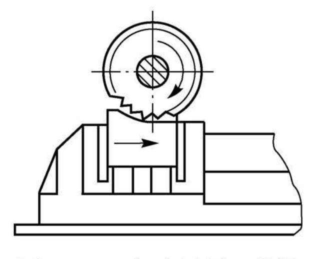


图10-5　机床用平口虎钳

2. 回转工作台

如图10-6所示，回转工作台又称转盘或圆工作台，一般用于较大零件的分度工作和非整圆弧面的加工。分度时，在回转工作台上配上三爪自定心卡盘，可以铣削四方、六方等零件。回转工作台有手动和机动两种方式，其内部有蜗杆蜗轮机构。

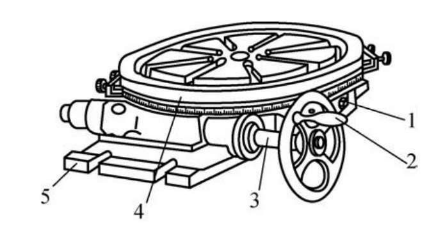


图10-6　回转工作台

1—螺钉；2—手轮；3—蜗杆轴；4—转台；5—底座

3. 分度头

分度头主要用来安装需要进行分度的零件，利用分度头可铣削多边形、齿轮、花键、刻线、螺旋面及球面等。分度头的种类很多，有简单分度头、万能分度头、光学分度头、自动分度头等，其中用得最多的是万能分度头。万能分度头结构如图10-7所示，万能分度头的基座1上装有回转体5，分度头主轴6可随回转体5在垂直平面内转

动 -6°~90°，主轴前端锥孔用于装顶尖，外部定位锥体用于装三爪自定心卡盘 9。分度时可转动分度手柄 4，通过蜗杆 8 和蜗轮 7 带动分度头主轴旋转进行分度，如图 10-8 所示为其传动示意图。

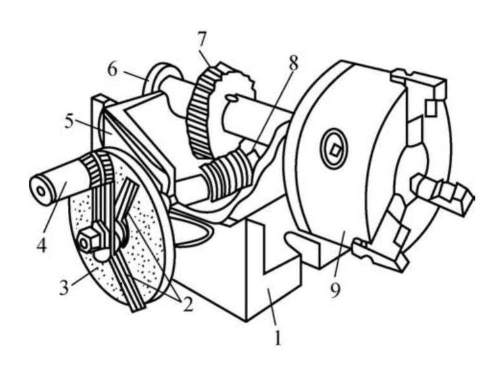


图 10-7　万能分度头

1—基座；2—扇形叉；3—分度盘；4—手柄；5—回转体；6—分度头主轴；7—蜗轮；8—蜗杆；9—三爪自定心卡盘

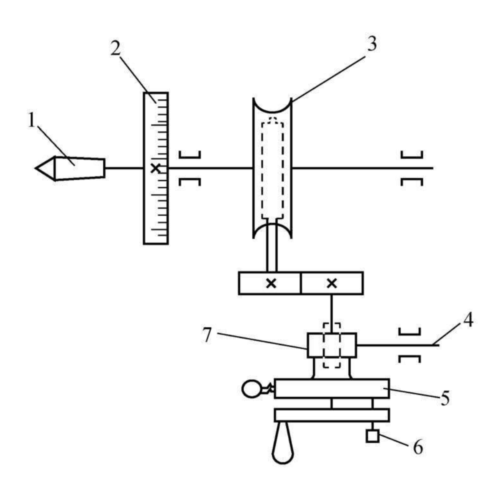


图 10-8　分度头传动示意图

1—主轴；2—刻度环；3—蜗杆蜗轮；4—挂轮轴；5—分度盘；6—定位销；7—螺旋齿轮

分度头中蜗杆和蜗轮的传动比为：

i = 蜗杆的头数/蜗轮的齿数 = 1/40

即当手柄通过一对直齿轮（传动比为 1∶1）带动蜗杆转动一周时，蜗轮只能带动主轴转过 1/40 周。

4. 万能铣头

如图 10-9 所示为万能铣头，在卧式铣床上装上万能铣头，不仅能完成各种立铣的工作，而且还可根据铣削的需要，把铣头主轴扳转成任意角度。其底座是用 4 个螺栓固定在铣床的垂直导轨上。铣床主轴的运动通过铣头内的两对齿数相同的锥齿轮传到铣头主轴上，因此铣头主轴的转数级数与铣床的转数级数相同。

壳体 3 可绕铣床主轴轴线偏转任意角度，壳体 3 还能相对铣头主轴壳体 2 偏转任意角度。因此，铣头主轴就能带动铣刀 1 在空间偏转成所需要的任意角度，从而扩大了

卧式铣床的加工范围。

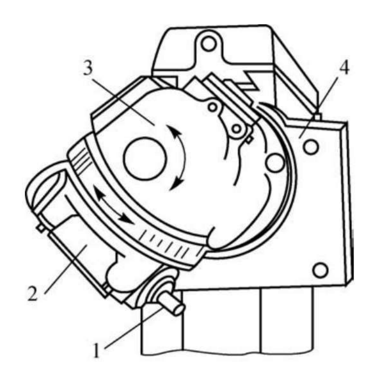


图 10－9　万能铣头

1—铣刀；2—铣头主轴壳体；3—壳体；4—底座



10.3　铣刀及其安装

铣刀实质上是一种多刃刀具，其刀齿分布在圆柱铣刀的外圆柱表面或端铣刀的端面上。

10.3.1　铣刀的分类

铣刀的种类很多，按其安装方法可分为带孔铣刀和带柄铣刀两大类。

1. 带孔铣刀

带孔铣刀适用于卧式铣床加工，能加工各种表面，应用范围较广，如图 10－10 所示。常用的带孔铣刀有圆柱铣刀、圆盘铣刀、角度铣刀、成形铣刀等。

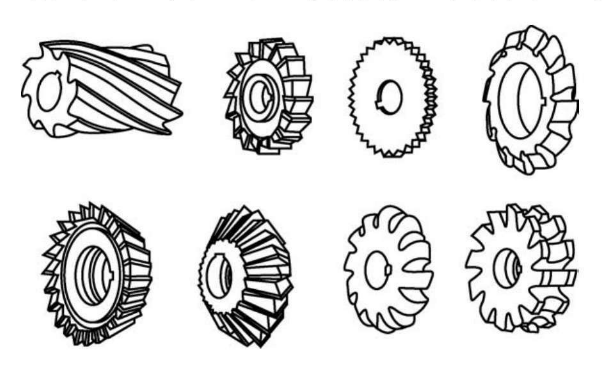


图 10－10　带孔铣刀

2. 带柄铣刀

带柄铣刀多用于立式铣床上，有直柄和锥柄之分如图 10－11 所示。一般直径小于 20 mm 的较小铣刀做成直柄；直径较大的铣刀多做成锥柄。常用的带柄铣刀有立铣刀、键槽铣刀、T 形槽铣刀和镶齿端铣刀等，其共同特点是都有供夹持用的刀柄。

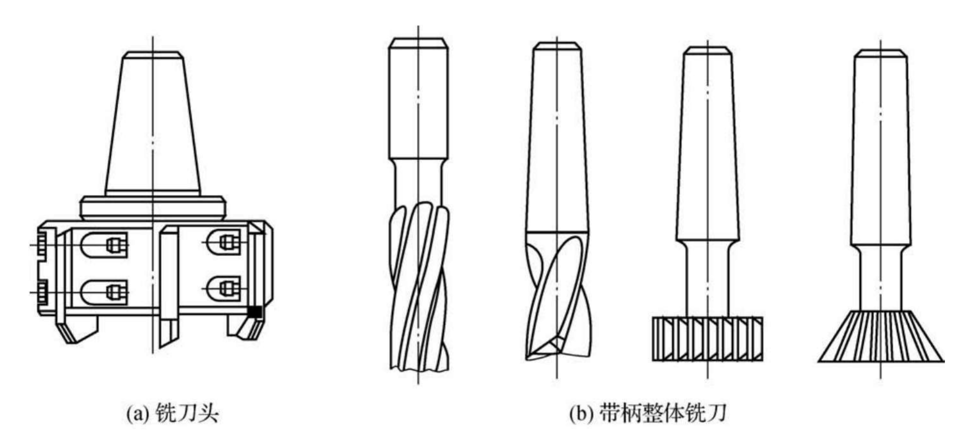


图 10－11　带柄铣刀

10.3.2　铣刀的安装

1. 带孔铣刀的安装

如图 10－12 所示，带孔铣刀多用铣刀杆安装，先将铣刀杆锥体一端插入主轴锥孔，用拉杆拉紧，刀具的轴向位置由套筒来定位，刀杆另一端用吊架支撑。

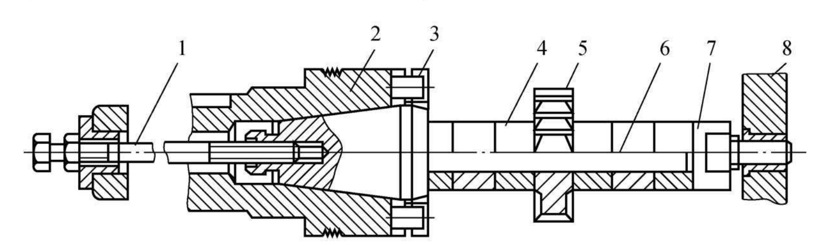


图 10－12　带孔铣刀的安装

1—拉杆；2—主轴；3—端面；4—套筒；5—铣刀；6—刀杆；7—压紧螺母；8—吊架

2. 带柄铣刀的安装

（1）直柄铣刀的安装

直柄铣刀常用弹簧夹来安装，如图 10－13（b）所示。安装时，收紧螺母，使弹簧套做径向收缩而将铣刀的柱柄加紧。

（2）锥柄铣刀的安装

当铣刀锥柄尺寸与主轴锥孔相同时，可直接装入锥孔，并用拉杆拉紧；如果铣刀锥柄尺寸与主轴孔内锥尺寸不同时，则根据铣刀锥柄的大小，选择合适的过渡锥套，将配合表面擦净，然后用拉杆把铣刀及过渡锥套一起拉紧在主轴上，如图 10－13（b）所示。

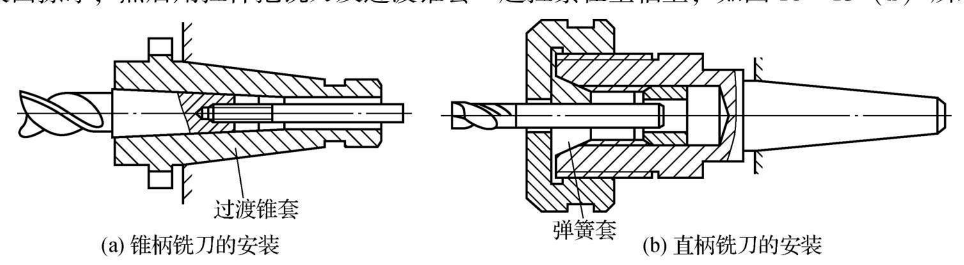


图 10－13　带柄铣刀的安装



10.4　主要铣削工作

铣削工作范围很广，常见的有铣平面、铣沟槽、铣成形面、钻孔、镗孔以及铣螺旋槽等。

10.4.1　铣平面

1. 铣水平面

铣平面可用周铣法或端铣法，并应优先采用端铣法。但在很多场合，例如在卧式铣床上铣平面，也常用周铣法。铣削平面的步骤如下。

（1）开车使铣刀旋转，升高工作台，使零件和铣刀稍微接触，记下刻度盘读数，如图 10－14（a）所示。

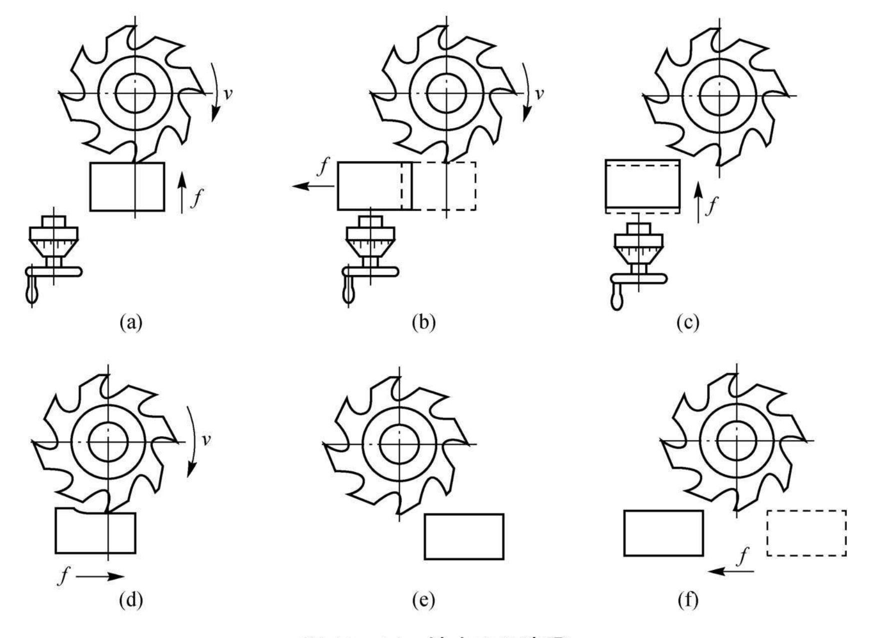


图 10－14　铣水平面步骤

（2）纵向退出零件，停车，如图 10－14（b）所示。

（3）利用刻度盘调整侧吃刀量（为垂直于铣刀轴线方向测量的切削层尺寸），使工作台升高到规定的位置，如图 10－14（c）所示。

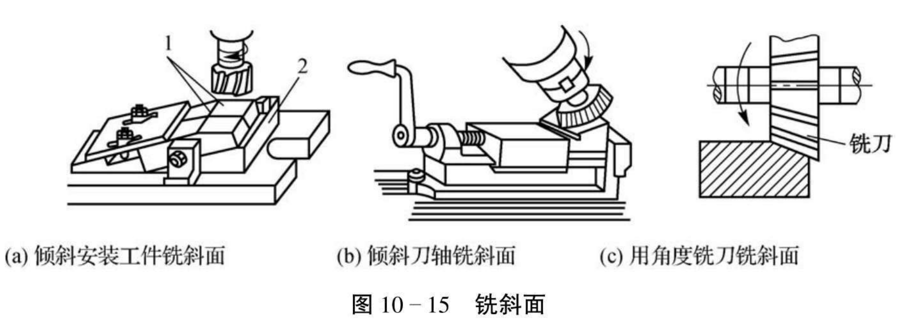
（4）开车先手动进给，当零件被稍微切入后，可改为自动进给，如图 10－14（d）所示。

（5）铣完一刀后停车，如图 10－14（e）所示。

（6）退回工作台，测量零件尺寸，并观察表面粗糙度，重复铣削到规定要求，如图 10－14（f）所示。

2. 铣斜面

铣斜面可以用如图 10－15（a）所示的倾斜零件法，也可用如图 10－15（b）所示的倾斜刀轴法，还可用与工件角度相符的角度铣刀直接铣斜面，如图 10－15（c）所示。

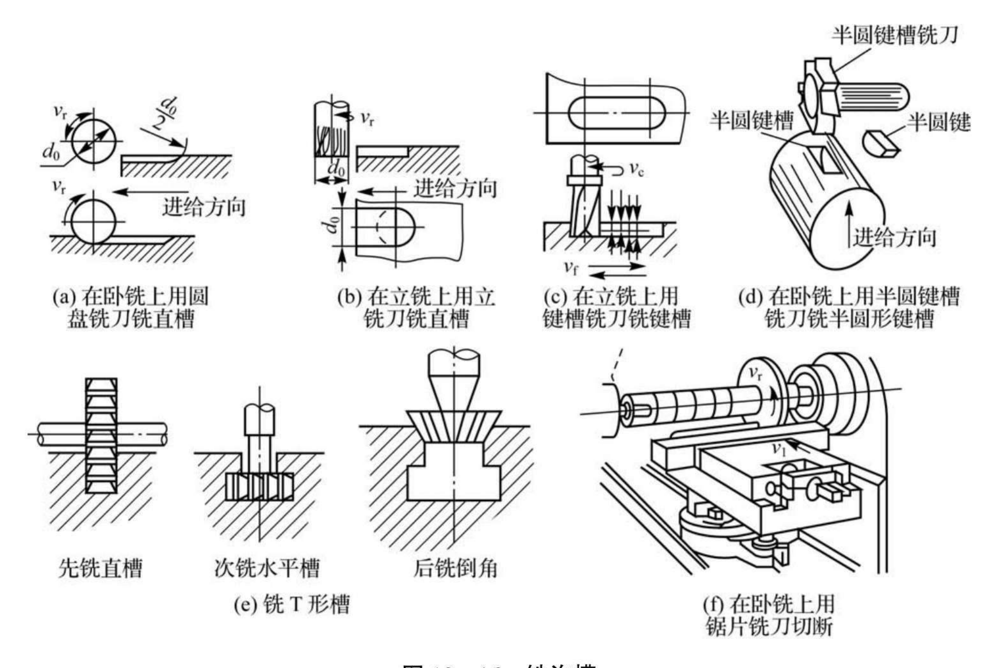


(a) 倾斜安装工件铣斜面　(b) 倾斜刀轴铣斜面　(c) 用角度铣刀铣斜面

图 10－15　铣斜面

3. 铣沟槽

铣削沟槽多采用直径为 2～20mm 的直柄立铣刀或盘铣刀，如图 10－16 所示。



(a) 在卧铣上用圆盘铣刀铣直槽　(b) 在立铣上用立铣刀铣直槽　(c) 在立铣上用键槽铣刀铣键槽　(d) 在卧铣上用半圆键槽铣刀铣半圆形键槽

(e) 铣 T 形槽　(f) 在卧铣上用锯片铣刀切断

图 10－16　铣沟槽



10.5　齿形加工方法

齿轮的种类很多，此处只限于讨论渐开线齿轮齿形的加工。按加工原理可分为成形法和展成法两大类。

10.5.1 成形法

成形法是采用与被切齿轮齿槽相符的成形刀具加工齿形的方法。

1. 齿轮铣刀的选择

应选择与被加工齿轮模数、压力角相等的齿轮铣刀，同时还要按齿轮的齿数选择合适号数的铣刀，表 10－1 为模数铣刀刀号的选择参考表。

表 10－1　模数铣刀刀号的选择

刀号	1	2	3	4	5	6	7	8
加工齿数范围	12~13	14~16	17~20	21~25	26~34	35~54	55~134	135 以上及齿条

2. 铣削方法

在卧式铣床上，将齿坯套在心轴上安装于分度头和尾架顶尖中，对刀并调整好铣削深度，开始铣第一个齿槽，铣完一齿后退出再次进行分度，依次逐个完成全部齿数的铣削，如图 10－17 所示。

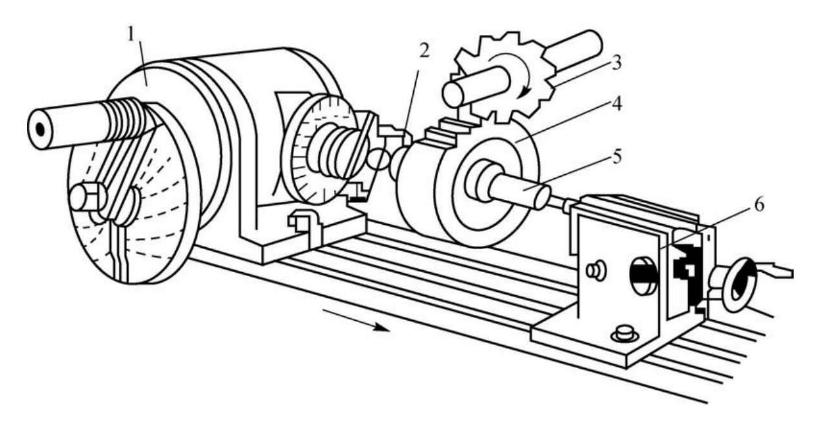


图 10－17　卧式铣床上铣齿轮

1—分度头；2—卡箍；3—模数铣刀；4—工件；5—心轴；6—尾架

3. 成形法齿形加工特点

（1）设备简单，刀具成本低；

（2）生产效率低，适用于小批量生产；

（3）齿轮加工精度低，只能达到 IT11~9 级。

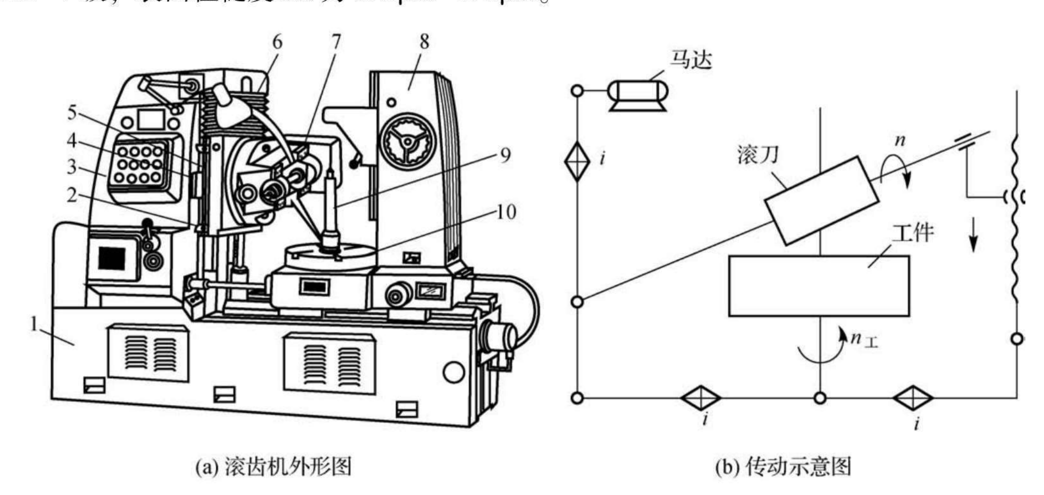
10.5.2 展成法

展成法是利用齿轮刀具与被切齿轮的啮合运转切出齿形的方法。最常用的方法是滚齿加工和插齿加工。

1. 滚齿加工

滚齿加工是用滚齿刀在滚齿机（如图 10－18 所示）上加工齿轮的方法。滚齿加工原理（如图 10－19 所示）为滚齿刀和齿坯模拟一对螺旋齿轮作啮合运动，滚齿刀好比

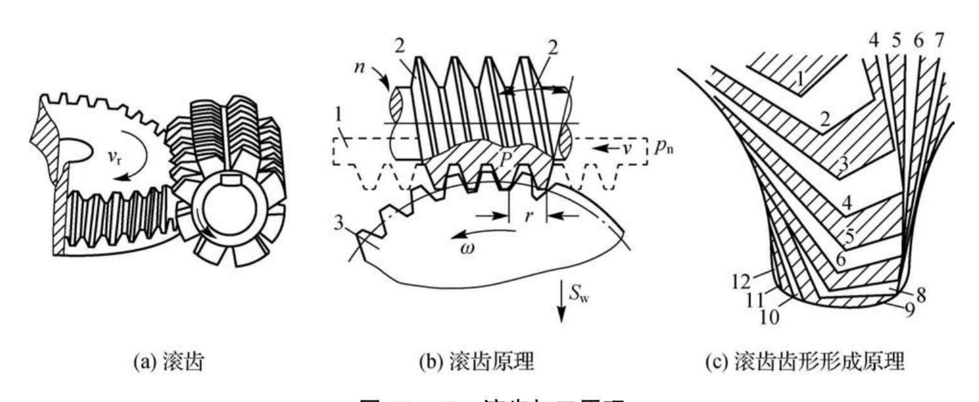
是一个齿数很少、齿很长的齿轮，形似蜗杆，经刃磨后形成一排排齿条刀齿。因此，可以把滚齿看成是齿条对齿坯的加工。滚切齿轮过程可分解为：前一排刀齿切下一薄层材料后，后一排刀齿切下时，由于旋转的刀具为螺旋形，所以使刀齿的位置向前移动了一小段距离，而齿轮坯则同时转过相应的角度，后一排刀齿便切下另一薄层材料。就这样，齿坯被一刀刀地切出整个齿槽，齿侧的齿形则被包络而成，所以这种方法可以用一把滚齿刀加工不同模数的齿轮，且不存在理论齿形误差。滚齿加工精度一般为 IT8~7 级，表面粗糙度 Ra 为 3.2μm~1.6μm。



(a) 滚齿机外形图　　(b) 传动示意图

图 10 - 18　滚齿机外形图与传动示意图

1—床身；2—挡铁；3—立柱；4—行程开关；5—挡铁；6—刀架；7—刀杆；8—支承架；9—工件心轴；10—工作台



(a) 滚齿　　(b) 滚齿原理　　(c) 滚齿齿形形成原理

图 10 - 19　滚齿加工原理

滚齿加工直齿圆柱齿轮时，滚齿机必须有以下几个运动。

①主运动　又称切削运动，为滚刀的旋转运动。

②展成运动　又称分齿运动，为工件的旋转运动。其运动速度必定和滚刀的旋转速度保持齿轮与齿条的啮合关系。即滚刀每转一转，工件转 K/Z 转，其中 K 为滚刀的头数，Z 为齿轮齿数。

③垂直进给运动　即滚刀沿工件轴线的垂直移动，这是保证切出整个齿宽所必需的。

2. 插齿加工

插齿加工在插齿机上进行，如图 10－20（c）所示。相当于一个齿轮的插齿刀与齿坯按一对齿轮作啮合运动而把齿形切成的。插齿刀的外形像一个齿轮，在每一个齿上磨出前角和后角以形成刀刃，切削时刀具做上下往复运动，从工件上切除切屑。可把插齿过程分解为：插齿刀先在齿坯上切下一小片材料，然后插齿刀退回并转过一小角度，齿坯也同样转过相应的角度。之后，插齿刀再次下插在齿坯上切下一小片材料，不断重复上述过程，整个齿槽就被加工出来了，齿形则被逐渐地包络而成，因此，一把插齿刀，可加工相同模数而齿数不同的齿形，不存在理论误差，插齿加工原理如图 10－20（a）所示。插齿加工精度一般为 IT8~7 级，表面粗糙度 *Ra* 约为 1.6μm。

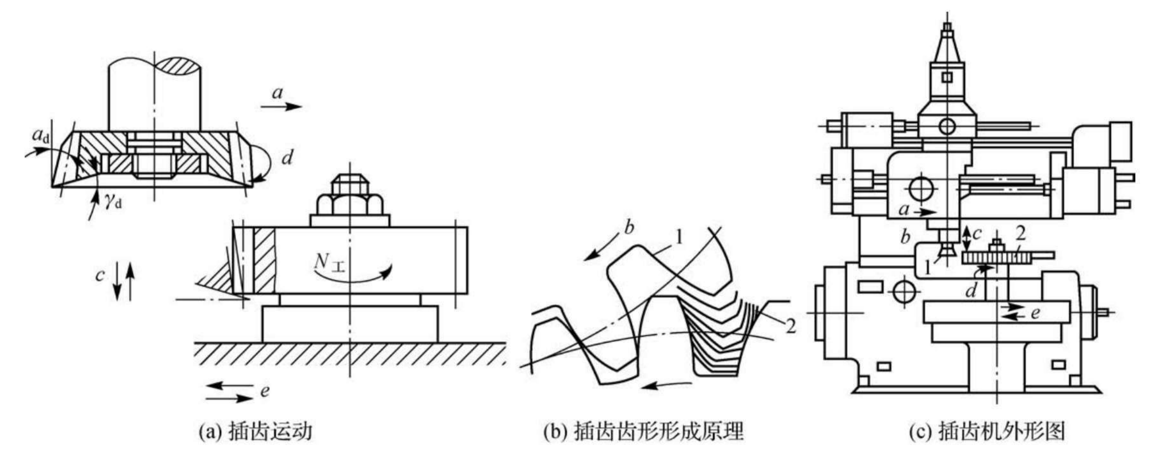


图 10－20　插齿机及其加工原理

插削直齿圆柱齿轮时，插齿机有以下几个运动。

①主运动　插齿刀的上下往复运动。

②展成运动　又称分齿运动，它是完成渐开线啮合原理的展成运动，应保证工件转过一齿时刀具亦相应转过一齿，以使插齿刀的刀刃包络成齿形的轮廓。

③周向进给运动　又称圆周进给运动，它控制插齿刀转动的速度。

④径向进给运动　它是完成渐开线啮合原理的展成运动，应保证工件转过一齿时刀具亦相应转过一齿，以使插齿刀的刀刃包络成齿形的轮廓。



10.6　铣削训练实例

10.6.1　铣削 V 形块

按照图纸要求（如图 10－21 所示），完成 V 形块的铣削加工。

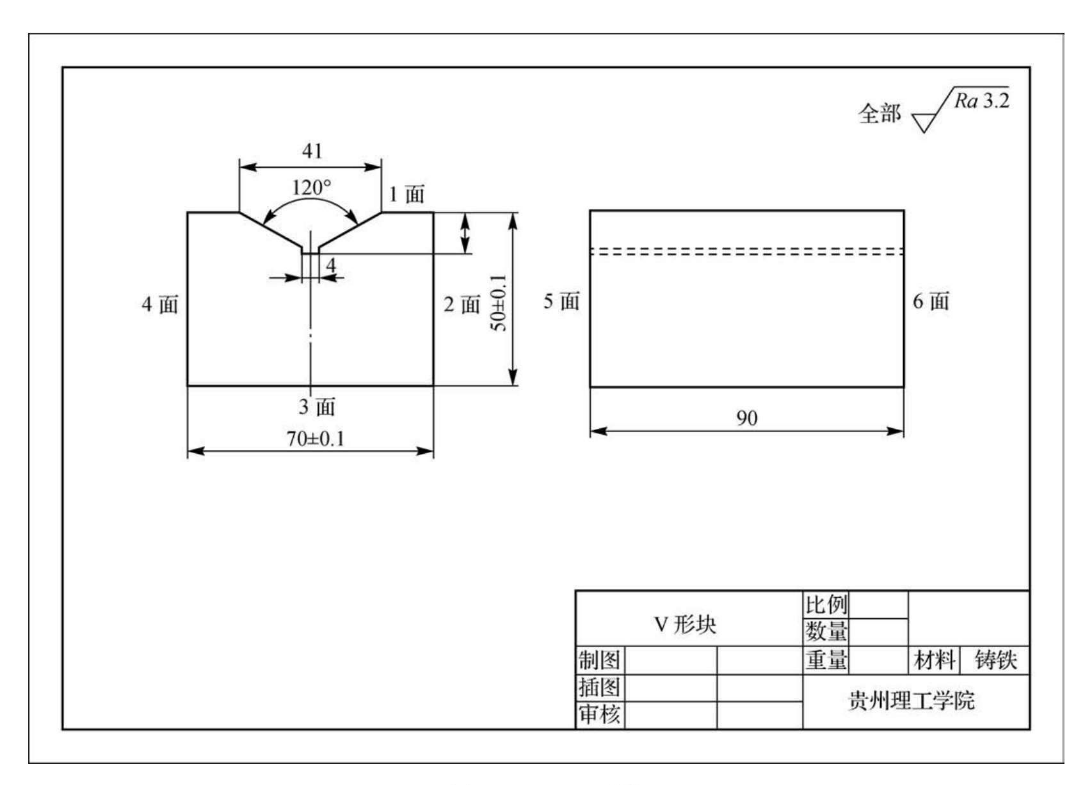


图 10－21　V 形块

V 形块的铣削操作步骤如表 10－2 所示。

表 10－2　V 形块铣削操作步骤

单位：mm

序号	加工简图	加工内容	刀具
1	4 1 3 2	将 3 面紧靠在平口虎钳导轨面上的平行垫铁上，以 3 面为基准，零件在两钳口之间被夹紧，铣平面 1，使 1、3 两面间的尺寸至 52	φ110mm 硬质合金镶齿端铣刀
2	2 1 3 4	以 1 面为基准，紧贴固定钳口，在零件与活动钳口间垫圆棒，夹紧后铣平面 2，使 2、4 两面间的尺寸至 72	φ110mm 硬质合金镶齿端铣刀

续表

序号	加工简图	加工内容	刀具
3	4 1 3 2	以 1 面为基准，紧贴固定钳口，翻转 180°，使 2 面朝下，紧贴平行垫铁，在零件与活动钳口间垫圆棒，夹紧后铣平面 4，使 2、4 两面间的尺寸至 70	φ110mm 硬质合金镶齿端铣刀
4	3 4 2 1	以 1 面为基准，铣平面 3，使 1、3 两面间的尺寸至 50	φ110mm 硬质合金镶齿端铣刀
5		铣 5、6 两面，使 5、6 两面间的尺寸至 90	φ110mm 硬质合金镶齿端铣刀
6	12 4	按划线找正，铣直槽，槽宽为 4，槽深为 12	切槽刀
7	41	铣 V 形槽至尺寸 41	角度铣刀

思考题

1. 铣床的主运动是什么？进给运动是什么？
2. 试叙述铣床的主要附件的名称和用途。
3. 利用卧式铣床和立式铣床都能加工平面，试比较其优缺点和各自适用场合。
4. 铣削齿轮的方法属于那种齿形加工方法？有何特点？
5. 试叙述分度头的工作原理。一工件需作 31 等份时，请说明分度方法。



第 11 章　磨削和刨削

教学目的和要求：磨削和刨削都是传统的机械加工方法。磨削是机械零件精加工的主要方法之一，可加工内外圆柱面、圆锥面和平面；刨削主要用于加工平面、沟槽和成形面。本章采用理论加实际的教学方法，使学生了解磨削和刨削的工艺特点及加工范围，了解常见磨床和刨床的种类及用途，掌握万能外圆磨床和牛头刨床的操作方法，并能操作万能外圆磨床和牛头刨床按图纸要求进行简单零件的磨削及刨削加工。

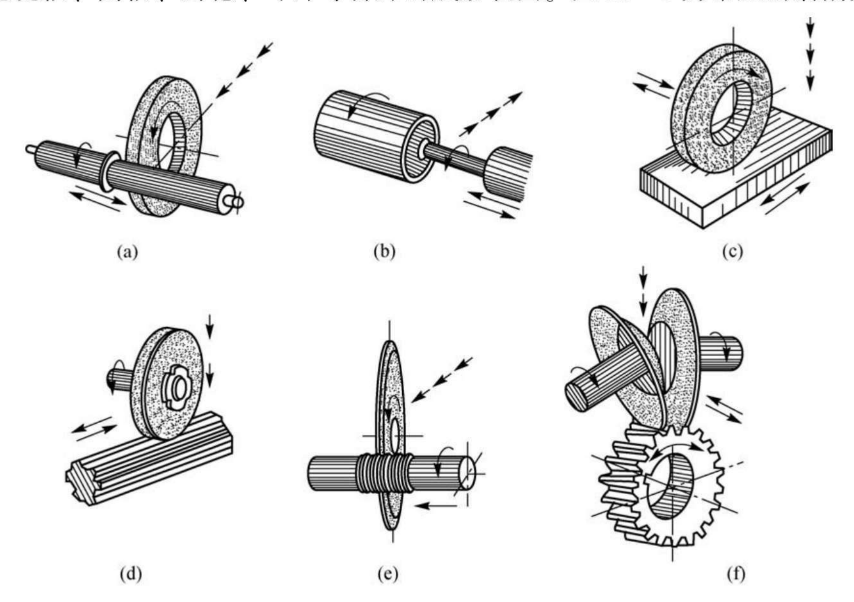


11.1　磨　　削

11.1.1　磨削概述

磨削加工是机械零件精加工的主要方法之一。磨削时可采用砂轮、油石、磨头、砂带等作磨具，而最常用的磨具是用磨料和黏结剂做成的砂轮。

磨削的加工范围很广，不仅可以加工内外圆柱面、内外圆锥面和平面，还可加工螺纹、花键轴、曲轴、齿轮、叶片等特殊的成形表面。图 11－1 为常见的磨削方法。



（a）外圆磨削；（b）内圆磨削；（c）平面磨削；（d）花键磨削；（e）螺纹磨削；（f）齿形磨削

图 11－1　常见的磨削方法

从本质上来说，磨削加工是一种切削加工，但和通常的车削、铣削、刨削等相比却有以下的特点。

1. 磨削属多刃、微刃切削

磨削用的砂轮是由许多细小坚硬的磨粒用结合剂黏结在一起经焙烧而成的疏松多孔体，如图 11-2 所示。这些锋利的磨粒就像铣刀的切削刃，在砂轮高速旋转的条件下，切入零件表面，故磨削是一种多刃、微刃切削过程。

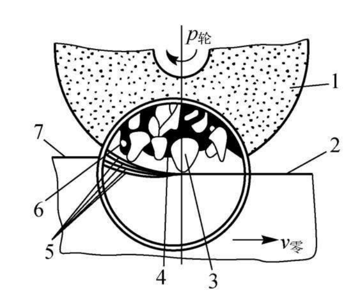


图 11-2　砂轮的组成

1—砂轮；2—已加工表面；3—磨粒；4—结合剂；5—加工表面；6—空隙；7—待加工表面

2. 加工精度高

磨削属于微刃切削，切削厚度极薄，每一磨粒切削厚度可小到数微米，故可获得很高的加工精度和低的表面粗糙度。通常磨削能达到的经济精度为 IT7~IT5，表面粗糙度 Ra 一般为 0.8~0.2μm，高精度磨削时，尺寸精度可超过 IT5，表面粗糙度 Ra 值不大于 0.012μm。

3. 磨削速度大

一般砂轮的圆周速度达 2000~3000m/min，目前的高速磨削砂轮线速度已达到 60~250m/s。故磨削时温度很高，磨削区的瞬时高温可达 800℃~1000℃。因此，为减少摩擦和迅速散热，降低磨削温度，及时冲走屑末，以保证零件表面质量，磨削时需使用大量切削液。

4. 加工材料广泛

由于磨料硬度极高，故磨削不仅可加工一般金属材料，如碳钢、铸铁等，还可加工一般刀具难以加工的高硬度材料，如淬火钢、各种切削刀具材料及硬质合金等。

磨削加工是机械制造中重要的加工工艺，已广泛用于各种表面的精密加工。特别是随着精密铸造、精密锻造等现代成形工艺的发展以及磨削技术自身的不断进步，越来越多的零件可以用铸坯、锻坯直接磨削就能达到精度要求。因此，磨削在机械制造业中的应用日益广泛。

11.1.2　磨床

磨床根据用途的不同分为外圆磨床、内圆磨床、平面磨床、齿轮磨床、螺纹磨床、导轨磨床、无心磨床、工具磨床等类型，最常用的是外圆磨床和平面磨床。

以较常见的 M1432A 型万能外圆磨床（如图 11－3 所示）为例进行介绍。

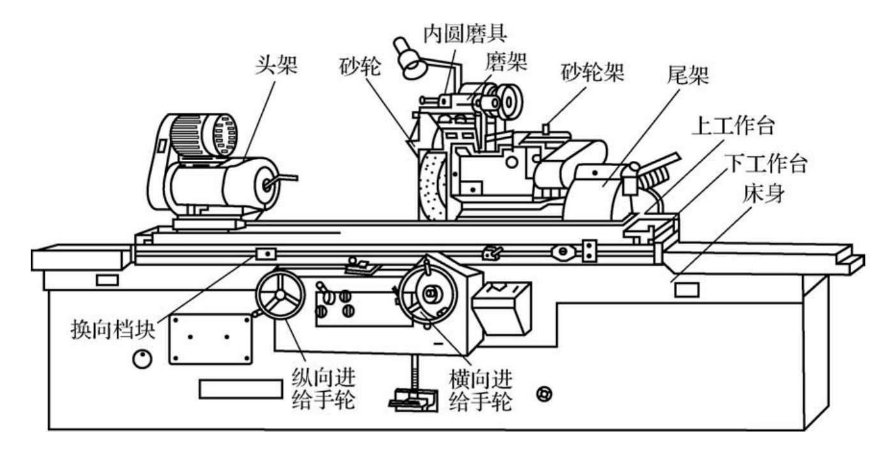


图 11－3　M1432A 型万能外圆磨床

1. 床身

用于支承和连接磨床各个部件，为提高机床刚度，磨床床身一般为箱型结构，内部装有液压传动装置，上部装有工作台和砂轮导架，床身上的纵向导轨供工作台移动用，横向导轨供砂轮架移动用。

2. 工作台

工作台由液压驱动沿着床身的纵向导轨上直线往复运动，使工件实现纵向进给。工作台可进行手动和自动进给。在工作台前侧面的 T 形槽内，装有两个转向挡块，用于操纵工作台自动换向，工作台有上、下两层，上层可在水平面内偏转一个不大的角度（±8°），以便磨削圆锥面。

3. 砂轮架

用于安装砂轮，由单独的电机通过皮带传动带动砂轮高速旋转，砂轮架可在床身后部的导轨上作横向移动，移动方式有自动周期进给、快速引进和退出、手动三种，前两种是由液压传动实现的。砂轮架还可绕垂直轴旋转某一角度。

4. 内圆磨头

内圆磨头用于磨削内圆表面。其主轴可安装内圆磨削砂轮，由另一电动机带动。内圆磨头可绕支架旋转，使用时翻下，不用时翻向砂轮架上方。

5. 头架

头架安装在上工作台上，头架上有主轴，主轴端部可安装顶尖、拨盘或卡盘，以便装夹零件并带动其旋转。头架内的双速电动机和变速机构可使零件获得不同的转速。头架在水平面内可偏转一定角度。

6. 尾架

尾架的套筒内有顶尖，用来支承工件的另一端。尾架在工作台上的位置可根据零

件的不同长度调整，当调整到所需的位置时将其紧固。尾架可在工作台上纵向移动，扳动尾座上的手柄时，套筒可伸出或缩进，以便装卸零件。

11.1.3 砂轮

砂轮是磨削的切削工具。磨粒、结合剂和空隙是构成砂轮的三要素。

1. 砂轮的特性及其选择

表示砂轮的特性主要包括磨料、粒度、硬度、结合剂、组织、形状和尺寸等。

磨料直接担负着切削工作，必须硬度高、耐热性好，还必须有锋利的棱边和一定的强度。常用磨料有刚玉类、碳化硅类和超硬磨料。常用的几种刚玉类、碳化硅类磨料的代号、特点及适用范围如表 11－1 所示。

表 11－1　常用磨料特点及其用途

磨料名称	代号	特点	用途
棕刚玉	A	硬度高，韧性好，价格较低	适合于磨削各种碳钢、合金钢和可锻铸铁等
白刚玉	WA	比棕刚玉硬度高，韧性低，价格较高	适合于加工淬火钢、高速钢和高碳钢
黑色碳化硅	C	硬度高，性脆而锋利，导热性好	用于磨削铸铁、青铜等脆性材料及硬质合金刀具
绿色碳化硅	GC	硬度比黑色碳化硅更高，导热性好	主要用于加工硬质合金、宝石、陶瓷和玻璃等

粒度是指磨粒颗粒的大小。粒度号越大，磨料越细，颗粒越小。可用筛选法或显微镜测量法来区别。粗磨或磨软金属时，用粗磨料；精磨或磨硬金属时，用细磨料。

硬度是指砂轮上磨料在外力作用下脱落的难易程度。磨粒易脱落，表明砂轮硬度低，反之则表明砂轮硬度高。砂轮的硬度与磨料的硬度无关。磨硬金属时，用软砂轮；磨软金属时，用硬砂轮。

常用结合剂有陶瓷结合剂（代号 V）、树脂结合剂（代号 B）、橡胶结合剂（代号 R）等。其中陶瓷结合剂做成的砂轮耐蚀性和耐热性很高，应用广泛。

组织是指砂轮中磨料、结合剂、空隙三者体积的比例关系。组织号是由磨料所占的百分比来确定的。

根据机床结构与磨削加工的需要，砂轮制成各种形状和尺寸。为方便选用，在砂轮的非工作表面上印有特性代号，如代号 PA 60KV6P300×40×75，表示砂轮的磨料为铬刚玉（PA），粒度为 60#，硬度为中软（K），结合剂为陶瓷（V），组织号为 6 号，形状为平形砂轮（P），尺寸外径为 300 mm，厚度为 40 mm，内径为 75 mm。

2. 砂轮的安装与平衡

砂轮因在高速下工作，安装时应首先检查外观没有裂纹后，再用木锤轻敲，如果声音嘶哑，则禁止使用，否则砂轮破裂后会飞出伤人。砂轮的安装方法如图 11－4 所示。

为使砂轮工作平稳，一般直径大于 125 mm 的砂轮都要进行平衡试验，如图 11－5 所示。将砂轮装在心轴 2 上，再将心轴放在平衡架 6 的平衡轨道 5 的刃口上。若不平衡，较重部分总是转到下面。这可移动法兰盘端面环槽内的平衡铁 4 进行调整。经反复平衡试验，直到砂轮可在刃口上任意位置都能静止，即说明砂轮各部分的质量分布均匀。这种方法称为静平衡。

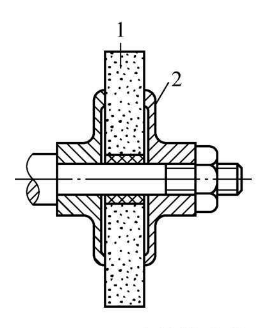


图 11－4　砂轮的安装

1—砂轮；2—弹性垫板



图 11－5　砂轮的平衡

1—砂轮套筒；2—心轴；3—砂轮；
4—平衡铁；5—平衡轨道；6—平衡架；

11.1.4　主要磨削工作

由于磨削的加工精度高，表面粗糙度值小，能磨高硬脆的材料，因此应用十分广泛。现就内外圆柱面、内外圆锥面及平面的磨削工艺进行讨论。

1. 外圆磨削

外圆磨削是一种基本的磨削方法，它适于轴类及外圆锥零件的外表面磨削。在外圆磨床上磨削外圆常用的方法有纵磨法、横磨法和综合磨法 3 种。

（1）纵磨法

如图 11－6（a）所示，磨削时，砂轮高速旋转起切削作用（主运动），零件转动（圆周进给）并与工作台一起作往复直线运动（纵向进给），当每一纵向行程或往复行程终了时，砂轮作周期性横向进给（被吃刀量）。纵向磨削的特点是具有较大适应性，一个砂轮可磨削长度不同的直径不等的各种零件，且加工质量好，但磨削效率较低。

（2）横磨法

如图 11－6（b）所示，横磨削时，采用砂轮的宽度大于零件表面的长度，零件无纵向进给运动，而砂轮以很慢的速度连续地或断续地向零件作横向进给，直至余量被全部磨掉为止。横磨的特点是生产率高，但精度及表面质量较低。

（3）综合磨法

如图 11－6（c）所示，先用横磨分段粗磨，相邻两段间有 5 mm~15 mm 重叠量，然后将留下的 0.01 mm~0.03 mm 余量用纵磨法磨去。当加工表面的长度为砂轮宽度的 2~3 倍以上时，可采用综合磨法。综合磨法能集纵磨、横磨法的优点为一身，既能提高生产效率，又能提高磨削质量。

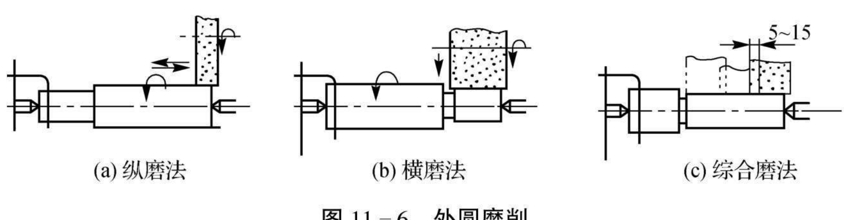


图 11－6　外圆磨削

2. 内圆磨削

内圆磨削方法与外圆磨削相似，只是砂轮的旋转方向与磨削外圆时相反（如图 11－7 所示），操作方法以纵磨法应用最广。

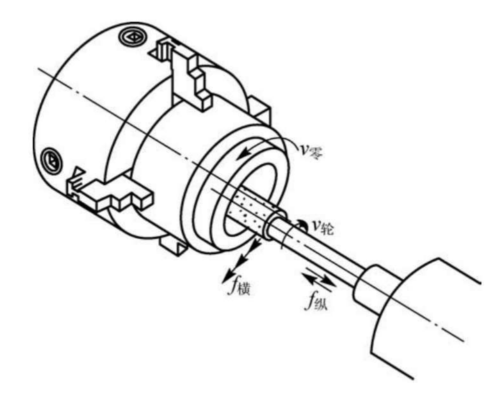


图 11－7　内圆磨削

3. 平面磨削

平面磨削的方法有两种：一种是周磨法，在卧式平面磨床上，利用砂轮的圆周对工件进行磨削，如图 11－8（a）所示；另一种是端磨法，在立轴平面磨床上，利用砂轮的端面对工件进行磨削，如图 11－8（b）所示。

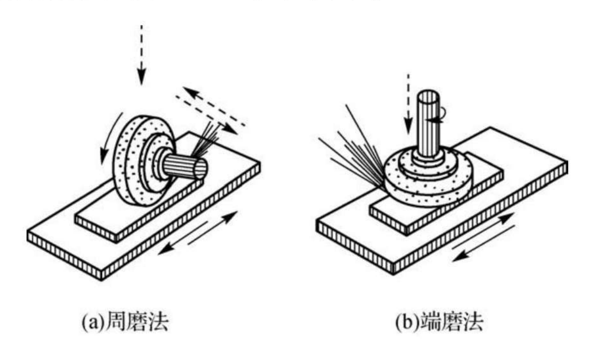


图 11－8　平面磨削

4. 圆锥面磨削

圆锥面磨削通常有转动工作台法和转动头架法两种。

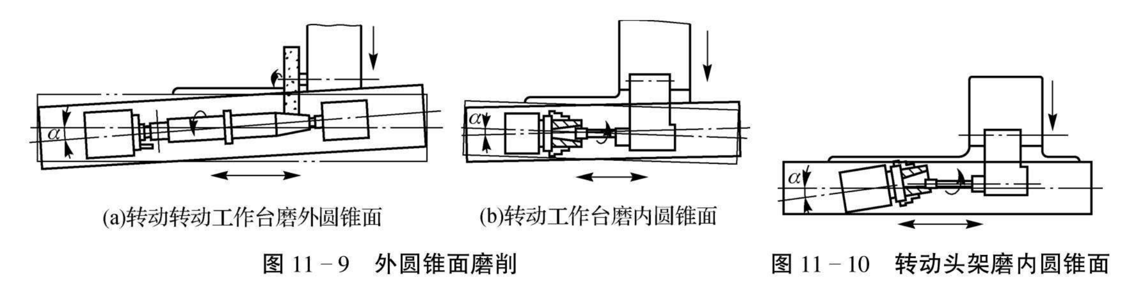
（1）转动工作台法

磨削外圆锥表面如图 11－9（a）所示，磨削内圆锥面如图 11－9（b）所示。转动

工作台法大多用于锥度较小、锥面较长的零件。

（2）转动零件头架法

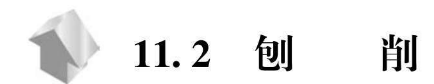
转动零件头架法常用于锥度较大、锥面较短的内外圆锥面，如图 11－10 所示为磨削内圆锥面。



(a)转动转动工作台磨外圆锥面　(b)转动工作台磨内圆锥面

图 11－9　外圆锥面磨削

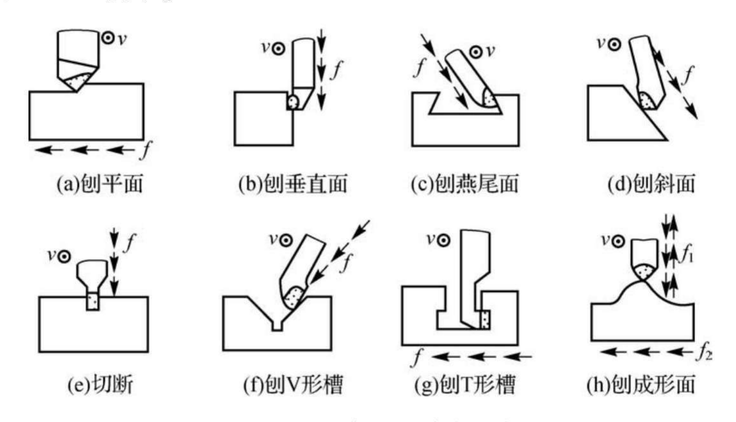
图 11－10　转动头架磨内圆锥面



11.2　刨　　削

11.2.1　刨削概述

刨削加工是在刨床上用刨刀对工件进行加工的一种切削方法。主要用于加工平面（包括水平面、垂直面、斜面）、沟槽（包括矩形槽、T 形槽、V 形槽、燕尾槽）和成形面等，如图 11－11 所示。



(a)刨平面　(b)刨垂直面　(c)刨燕尾面　(d)刨斜面

(e)切断　(f)刨V形槽　(g)刨T形槽　(h)刨成形面

图 11－11　刨削加工的主要应用

11.2.2　刨销加工

1. 刨床

常用的刨床设备有牛头刨床、龙门刨床、插床和拉床，其中最常见的是牛头刨床，本章节主要介绍牛头刨床。

牛头刨床主要由床身、滑枕、刀架、工作台、横梁、底座等组成，如图 11－12 是

B6065 型牛头刨床外形图。

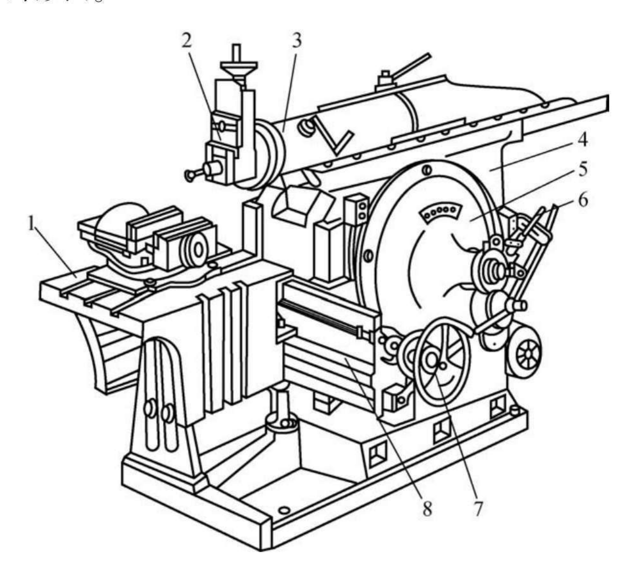


图 11－12　B6065 型牛头刨床外形图

1—工作台；2—刀架；3—滑枕；4—床身；5—摆杆机构；
6—变速机构；7—进给机构；8—横梁

（1）床身　用以支承和连接刨床各部件。其顶面水平导轨供滑枕带动刀架进行往复直线运动，侧面的垂直导轨供横梁带动工作台升降。床身内部有主运动变速机构和摆杆机构。

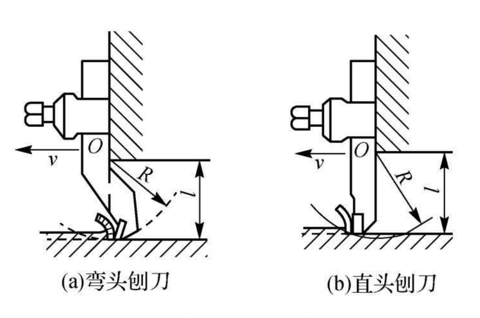
（2）滑枕　用以带动刀架沿床身水平导轨作往复直线运动。滑枕往复直线运动的快慢、行程的长度和位置，均可根据加工需要调整。

（3）刀架　用以夹持刨刀。当转动刀架手柄 5 时，滑板 4 带着刨刀沿刻度转盘 7 上的导轨上、下移动，以调整背吃刀量或加工垂直面时作进给运动。松开转盘 7 上的螺母，将转盘扳转一定角度，可使刀架斜向进给，以加工斜面。刀座 3 装在滑板 4 上。抬刀板 2 可绕刀座上的销轴向上抬起，以使刨刀在返回行程时离开零件已加工表面，以减少刀具与零件的摩擦。

（4）工作台　用以安装零件，可随横梁作上下调整，也可沿横梁导轨作水平移动或间歇进给运动。

2. 刨刀

刨刀的几何形状与车刀相似，但刀杆的截面积比车刀大 1.25~1.5 倍，以承受较大的冲击力。刨刀的前角 γ_0 比车刀稍小，刃倾角取较大的负值，以增加刀头的强度。刨刀的一个显著特点是刨刀的刀头往往做成弯头，如图 11－13 所示为弯、直头刨刀比较示意图。做成弯头的目的是为了当刀具碰到零件表面上的硬点时，刀头能绕 O 点向后上方弹起，使切削刃离开零件表面，不会啃入零件已加工表面或损坏切削刃。



(a)弯头刨刀　　(b)直头刨刀

图 11－13　弯头刨刀和直头刨刀



（1）刨刀的种类及其应用

刨刀的形状和种类依加工表面形状不同而有所不同。常用刨刀及其应用见本章实例。

(2) 刨刀的安装

如图 11-14 所示，安装刨刀时，将转盘对准零线，以便准确控制背吃刀量，刀头不要伸出太长，以免产生振动和折断。直头刨刀伸出长度一般为刀杆厚度的 1.5~2 倍，弯头刨刀伸出长度可稍长些，以弯曲部分不碰刀座为宜。装刀或卸刀时，应使刀尖离开零件表面，以防损坏刀具或者擦伤零件表面，必须一只手扶住刨刀，另一只手使用扳手，用力方向自上而下，否则容易将抬刀板掀起，碰伤或夹伤手指。

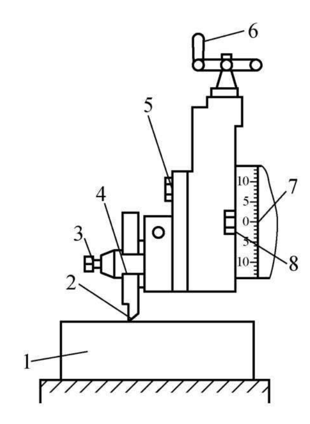


图 11-14　刨刀的安装

1—零件；2—刀头伸出要短；3—刀夹螺钉；4—刀夹 5—刀座螺钉；6—刀架进给手柄；7—转盘对准零线；8—转盘螺钉

3. 主要刨削工作

刨削主要用于加工平面、沟槽和成形面。

(1) 刨平面

1) 刨水平面

刨削水平面的顺序如下。

正确安装刀具和零件。

调整工作台的高度，使刀尖轻微接触零件表面。

调整滑枕的行程长度和起始位置。

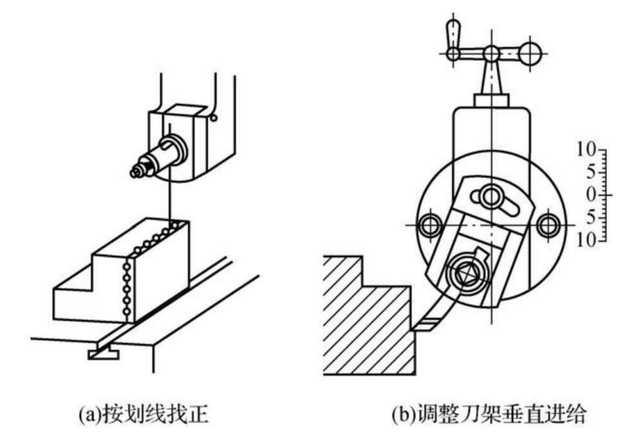
根据零件材料、形状、尺寸等要求，合理选择切削用量。

试切，先用手动试切。进给 1 mm~1.5 mm 后停车，测量尺寸，根据测得结果调整背吃刀量，再自动进给进行刨削。当零件表面粗糙度 Ra 值低于 6.3 μm 时，应先粗刨，再精刨。精刨时，背吃刀量和进给量应小些，切削速度应适当高些。此外，在刨刀返回行程时，用手掀起刀座上的抬刀板，使刀具离开已加工表面，以保证零件表面质量。

检验。零件刨削完工后，停车检验，尺寸和加工精度合格后即可卸下。

2) 刨垂直面和斜面

刨垂直面的方法如图 11-15 所示。此时采用偏刀，并使刀具的伸出长度大于整个刨削面的高度。刀架转盘应对准零线，以使刨刀沿垂直方向移动。刀座必须偏转 10°~15°，以使刨刀在返回行程时离开零件表面，减少刀具的磨损，避免零件已加工表面被划伤。刨垂直面和斜面的加工方法一般在不能或不便于进行水平面刨削时才使用。



(a)按划线找正　　(b)调整刀架垂直进给

图 11－15　刨垂直面

刨斜面与刨垂直面基本相同，只是刀架转盘必须按零件所需加工的斜面扳转一定角度，以使刨刀沿斜面方向移动。

（2）刨沟槽

1）刨直槽

刨直槽时用切刀以垂直进给完成，如图 11－16 所示。

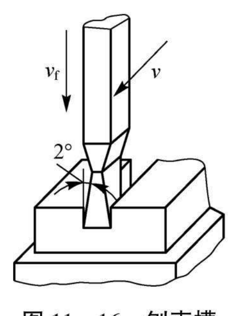
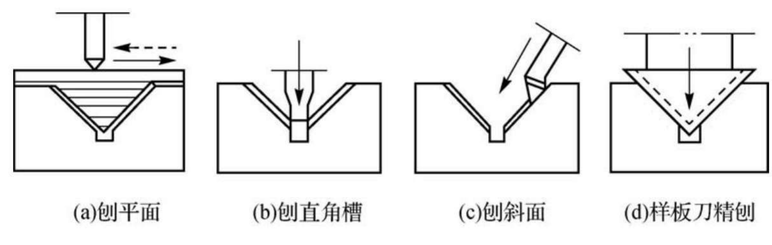


图 11－16　刨直槽

2）刨 V 形槽

刨 V 形槽的方法如图 11－17 所示，先按刨平面的方法把 V 形槽粗刨出大致形状如图 11－17（a）所示；然后用切刀刨 V 形槽底的直角槽如图 11－17（b）所示；再按刨斜面的方法用偏刀刨 V 形槽的两斜面如图 11－17（c）所示；最后用样板刀精刨至图样要求的尺寸精度和表面粗糙度如图 11－17（d）所示。



(a)刨平面　(b)刨直角槽　(c)刨斜面　(d)样板刀精刨

图 11－17　刨 V 形槽

3）刨 T 形槽

刨 T 形槽时，应先在零件端面和上平面划出加工线，如图 11－18 所示。

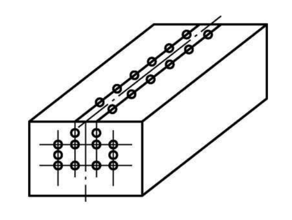


图 11－18　T 形槽零件划线图

4）刨燕尾槽

刨燕尾槽与刨 T 形槽相似，应先在零件端面和上平面划出加工线。但刨侧面时须用角度偏刀，如图 11－19 所示，刀架转盘要扳转一定角度。

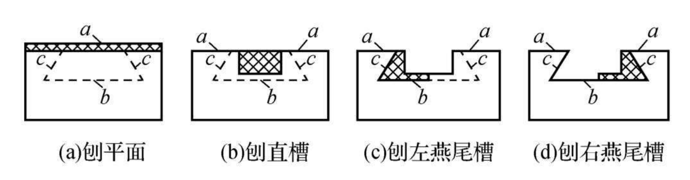


图 11－19　燕尾槽的刨削步骤

（3）刨成形面

在刨床上刨削成形面，通常是先在零件的侧面划线，然后根据划线分别移动刨刀作垂直进给和移动工作台作水平进给，从而加工出成形面，也可用成形刨刀加工，使刨刀刃口形状与零件表面一致，一次成形。



11.3　磨削及刨削训练实例

11.3.1　磨削轴套

按照图纸要求（如图 11－20 所示），完成轴套的磨削加工，零件材料为 38CrMoAl。

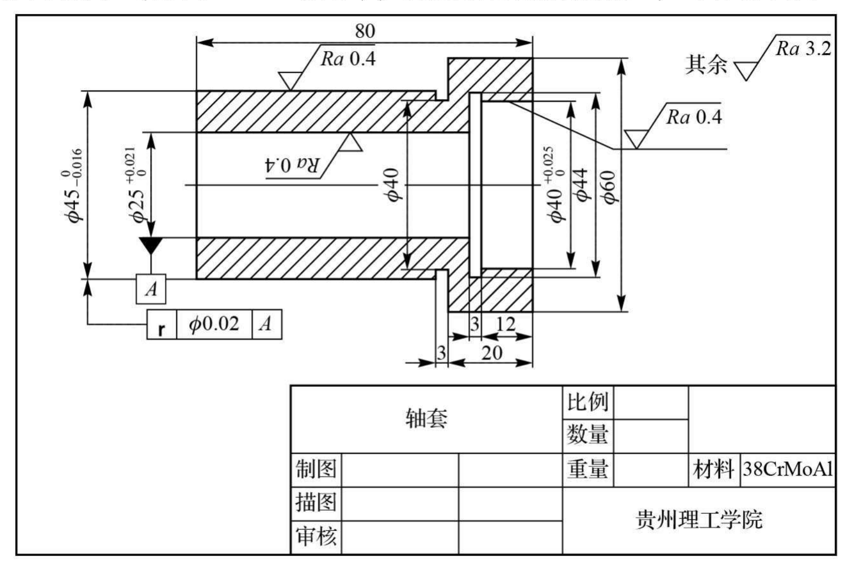


图 11－20　轴套

轴套的磨削操作步骤如表 11-2 所示。

表 11-2　轴套的磨削操作步骤

单位：mm

序号	加工内容	砂轮	装夹方法
1	以 $\varphi45_{-0.016}^{\ 0}$ 外圆定位，百分表找正，粗磨 φ25 内孔，留精磨余量 0.04 ~0.06	PA60KV6P20×6×6	三爪自定心卡盘
2	粗磨 $\varphi40_{\ 0}^{+0.025}$ 内孔，留精磨余量 0.04 ~0.06	PA60KV6P30×10×10	三爪自定心卡盘
3	精磨 $\varphi40_{\ 0}^{+0.025}$ 内孔，达到尺寸要求	PA80KV6P30×10×10	三爪自定心卡盘
4	精磨 $\varphi25_{\ 0}^{+0.021}$ 内孔，达到尺寸要求	PA60KV6P20×6×6	三爪自定心卡盘
5	以 $\varphi25_{\ 0}^{+0.021}$ 内孔定位，粗、精磨 $\varphi45_{-0.016}^{\ 0}$ 外圆至尺寸要求	WA80KV6P300×40×75	心轴

11.3.2　刨削 T 形块

按照图纸要求（如图 11-21 所示），完成 T 形块的刨削加工，其毛坯为铸铁件。

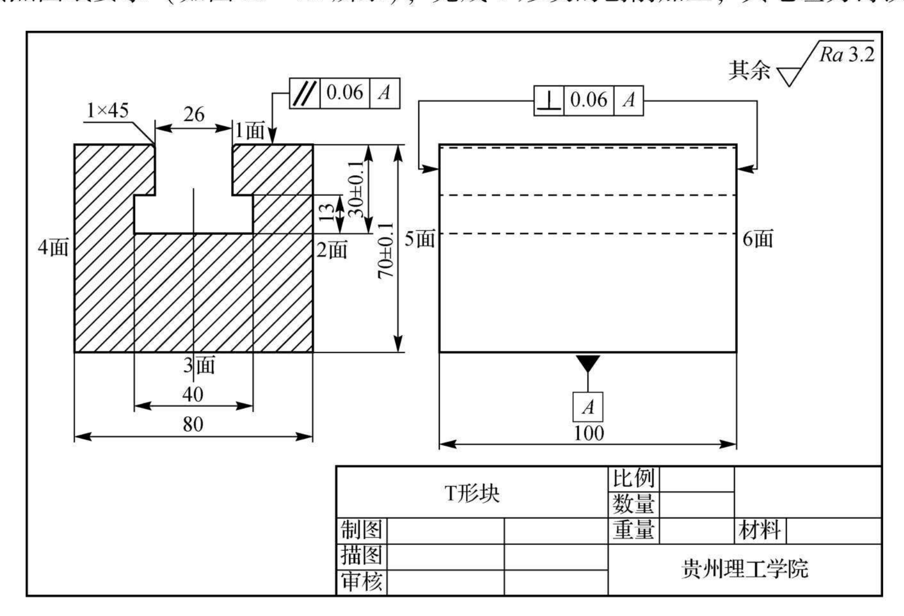


图 11-21　T 形块

T 形块的刨削操作步骤如表 11-3 所示。

表 11－3　T 形块的刨削操作步骤　　单位：mm

序号	加工简图	加工内容	刀具
1		将 3 面紧靠在平口虎钳导轨面上的平行垫铁上，以 3 面为基准，零件在两钳口之间被夹紧，刨平面 1，使 1、3 两面间的尺寸至 72	平面刨刀
2		以 1 面为基准，紧贴固定钳口，在零件与活动钳口间垫圆棒，夹紧后刨平面 2，使 2、4 两面间的尺寸至 82	平面刨刀
3		以 1 面为基准，紧贴固定钳口，翻转 180°，使 2 面朝下，紧贴平行垫铁，在零件与活动钳口间垫圆棒，夹紧后刨平面 4，使 2、4 两面间的尺寸至 80	平面刨刀
4		以 1 面为基准，刨平面 3，使 1、3 两面间的尺寸至 70	平面刨刀
5		刨 5、6 两面，使 5、6 两面间的尺寸至 100	刨垂直面偏刀
6		按划出的 T 形槽加工线找正，用切槽刀垂直进给刨出直槽，切至槽深 30，横向进给，依次切槽宽至 26	切槽刀
7		用弯切刀向右进给刨右凹槽	弯切刀

续表

序号	加工简图	加工内容	刀具
8	f	用弯切刀向左进给刨左凹槽，保证键槽尺寸 40	弯切刀
9	f	用 45°刨刀倒角	45°刨刀

思考题

1. 砂轮的特性包括哪些内容？受哪些因素的影响？
2. 外圆磨削的方法有哪些？各有什么特点？
3. 磨削加工时切削液起什么作用？
4. 刨床的主运动和进给运动是什么？刨削运动有何特点？
5. 为什么刨刀往往制成弯头的？与车刀相比刨刀的结构有什么特点？

第四篇

数 控 技 术

第12章　数控车削加工

教学目的和要求： 数控车床是指用数字程序控制的车床，主要用于轴类和盘类回转零件的加工，通过加工程序的控制机床自动完成内、外回转面的切削加工。数控车床加工效率高，精度稳定性好，劳动强度低，特别适应于形状复杂零件、中小批量的加工和新产品的试制等。数控机床是按所编程序自动进行零件加工的，大大减少了操作者的人为误差，并且可以自动地进行检测及补偿，达到非常高的精度。数控车削加工要求学生能够了解机床坐标系的概念，了解数控车床的组成；熟悉面板按键的基本功能；熟悉数控车削工艺的编制；熟悉程序编制的一般格式和要求；掌握常用车削加工指令的格式和使用范围；掌握对刀的操作步骤，掌握零件数控车削加工的质量控制方法。



12.1　数控车削加工概述

数控车床是数字程序控制车床的简称，它集通用性好的万能型车床、加工精度高的精密型车床和加工效率高的专用型普通车床的特点于一身，是国内使用量大、覆盖面广的一种数控机床。数控车床主要用于加工轴套类、盘盖类等回转体零件。通过数控加工程序的运行，可自动完成内外圆柱面、圆锥面、成形表面、螺纹和端面等工序的切削加工，并能进行车槽、钻孔、扩孔、铰孔等工作。车削中心可在一次装夹中完成更多的加工工序，提高加工精度和生产效率，特别适合于复杂形状回转类零件的加工。

12.1.1　数控车床的基本构成

数控车床一般由数控系统、伺服驱动系统、检测装置、输入/输出设备、辅助装置、机床本体等组成。数控系统是数控车床的控制核心，相当于人类的大脑。伺服系统是数控车床的动力部分，主要实现主运动和进给运动。检测装置是数控车床的重要组成部分，对加工精度、生产效率和自动化程度有很大影响。机床本体是指数控车床的机械部件，主要包括床身、主轴箱、刀架、尾座、进给传动机构等。

1. 数控系统：

数控系统的核心是计算机及其软件，它在数控车床中起“指挥”作用。数控系统接收由加工程序送来的各种信息，并经处理和调配后，向驱动机构发出执行命令，相当于人类的大脑。在执行过程中，驱动、检测等机构同时将有关信息反馈给数控系统，

以便经处理后发出新的执行命令。

2. 伺服驱动系统：

伺服驱动系统由伺服单元和驱动装置组成。

（1）伺服单元：由驱动器、驱动电机组成，并与机床上的执行部件和机械传动部件组成数控机床的进给系统。它的作用是把来自数控装置的脉冲信号转换成机床移动部件的运动。对于步进电机来说，每一个脉冲信号使电机转过一个角度，进而带动机床移动部件移动一个微小距离。每个进给运动的执行部件都有相应的伺服驱动系统，整个机床的性能主要取决于伺服系统。

（2）驱动装置

驱动装置把经放大的指令信号变为机械运动，通过简单的机械连接部件驱动机床，使工作台精确定位或按规定的轨迹作严格的相对运动，最后加工出图纸所要求的零件。和伺服单元相对应，驱动装置有步进电机、直流伺服电机和交流伺服电机等。

3. 检测装置

检测装置也称反馈元件，包括光栅、旋转编码器、激光测距仪、磁栅等。可分为角度检测和位置检测。角度检测元件通常安装在电动机的转轴上，用于检测电动机的旋转角度。位置测量元件通常安装在机床的工作台或丝杠上，它把机床工作台的实际位移转变成电信号反馈给 CNC 装置，供 CNC 装置与指令值比较产生误差信号，以控制机床向消除该误差的方向移动。

4. 输入/输出设备

输入装置将各种加工信息传递于计算机的外部设备。在数控机床产生初期，输入装置为穿孔纸带，现已淘汰，后来发展成盒式磁带，再发展成键盘、磁盘等便携式硬件，极大方便了信息输入工作，现通用 DNC 网络通信串行通信的方式输入。输出指输出内部工作参数（含机床正常、理想工作状态下的原始参数，故障诊断参数等），一般在机床开始工作状态需输出这些参数作记录保存，待工作一段时间后，再将输出与原始资料作比较、对照，可帮助判断机床工作是否维持正常。

5. 辅助控制装置

辅助控制装置的主要作用是接收数控装置输出的开关量指令信号，经过编译，逻辑判别和运算，再经功率放大后驱动相应的电器，带动机床的机械，液压，气动等辅助装置完成指令规定的开关量动作。

6. 车床本体

数控车床本体除了基本保持普通车床传统布局形式的部分经济型数控车床外，目前大部分数控车床均已通过专门设计并定型生产。主要包括主轴及主轴箱、机械传动机构、导轨、床身和自动刀架等部分。

12.1.2　数控车床的分类

1. 按车床主轴位置分类

按车床主轴位置分布不同可将数控车床分为卧式数控车床和立式数控车床两大类。

(1) 卧式数控车床：卧式车床的主轴平行于水平面，一般采用三爪卡盘来装夹工件。这类车床主要用于加工轴向尺寸大，径向尺寸相对小的小型复杂零件。

(2) 立式数控车床：立式车床主轴垂直于水平面。主轴与工作台呈倒立状态。工件通常装夹在一个直径很大的圆形工作台上。这类车床用于加工径向尺寸大、轴向尺寸相对较小的大型复杂零件。

2. 按照伺服系统类型分类

数控车床可分为开环控制数控车床、半闭环控制数控车床和闭环控制数控车床三种类型。

(1) 开环控制数控车床。开环控制数控车床的进给伺服系统是开环的，即没有检测装置，一般由步进电机作为其驱动电机。数控系统发出的指令信号是单向的，不存在系统的稳定性问题。这种控制方式的最大特点是控制方便、结构简单、价格便宜。

(2) 半闭环控制数控车床．半闭环控制数控车床的位置采用转角检测元件，直接安装在伺服电机或丝杠端部。由于大部分机械传动环节未包括在系统闭环环路内，因此可以获得较稳定的控制特性，丝杠等机械传动误差不能通过反馈来随时校正，但可以采用软件定值补偿方法来适当提高其精度。这种机床进给系统的控制精度取决于测量元件的精度和转动系统的传动精度。目前大部分数控车床采用这种控制方式。

(3) 闭环控制数控车床。闭环控制数控车床的位置检测装置采用直线位移测量元件，安装在床鞍部位，即直接检测机床坐标的直线位移量，通过反馈可以消除从电机到机床床鞍整个机械传动链中的传动误差，从而得到很高的机床静态定位精度。这种机床的系统设计和调整相当复杂，成本较高。

3. 按功能分类

数控车床可分为经济型数控车床、普通数控车床、车削加工中心等。

12.1.3　数控车床的加工对象及结构特点

1. 数控车床的加工对象

数控车床加工精度高，能做直线和圆弧插补，还有部分车床数控装置具有某些非圆曲线插补功能以及在加工过程中能自动变速等特点，因此数控车床的工艺范围较普通车床宽得多，是目前国内使用极为广泛的一种数控机床，约占数控机床总数的25%，数控车床加工的主要对象包括轮廓特别复杂或难以控制尺寸的回转体零件；精度要求高的零件；特殊螺纹和蜗杆等螺旋类零件。

2. 数控车床的结构特点

与传统车床相比，数控车床结构仍然由主轴箱、进给传动机构、刀架和床身等部

件组成，数控车床的结构与普通车床的结构相比具有本质的区别。

（1）由于数控车床刀架的两个方向运动分别由两台伺服电动机驱动，所以它的传动链短。不必使用挂轮、光杠等传动部件，用伺服电动机直接与丝杠联结带动刀架运动。伺服电动机丝杠间也可以用同步皮带副或齿轮副联结。

（2）多功能数控车床是采用直流或交流主轴控制单元来驱动主轴，按控制指令作无级变速，主轴之间不必用多级齿轮副来进行变速。为扩大变速范围，现在一般还要通过一级齿轮副，以实现分段无级调速，即使这样，床头箱内的结构已比传统车床简单得多。数控车床的另一个结构特点是刚度大，这是为了与控制系统的高精度控制相匹配，以便适应高精度的加工。

(3)、数控车床的第三个结构特点是轻拖动。刀架移动一般采用滚珠丝杠副。滚珠丝杠副是数控车床的关键机械部件之一，滚珠丝杠两端安装的滚动轴承是专用轴承，它的压力角比常用的向心推力球轴承要大得多。

（4）为了拖动轻便，数控车床的润滑都比较充分，大部分采用油雾自动润滑。

（5）由于数控机床的价格较高、控制系统的寿命较长，所以数控车床的滑动导轨也要求耐磨性好。数控车床一般采用镶钢导轨，这样机床精度保持的时间就比较长，其使用寿命也可延长许多。

（6）数控车床还具有加工冷却充分、防护较严密等特点，自动运转时一般都处于全封闭或半封闭状态。

12.1.4　数控车床的加工原理及过程

1. 数控车床的加工原理

按照零件车削加工的技术要求和工艺要求，编写零件的加工程序，然后将加工程序输入到数控装置，通过数控装置控制机床的主轴运动、进给运动、更换刀具，以及工件的夹紧与松开，冷却、润滑泵的开与关，使刀具、工件和其它辅助装置严格按照加工程序规定的顺序、轨迹和参数进行工作，从而加工出符合图纸要求的零件。

2. 数控车床的加工过程

（1）程序设计

程序是指规定机床各工作部件按预定要求动作的操作指令和数据，数控机床的程序，除包括动作及其顺序外，还包括各动作的运动要素及其他工艺要求等。从分析零件图，制定数控机床程序，到做出控制介质的全过程，统称为编程或程序设计。

编制程序时，应根据零件图的要求（形状尺寸，材料及技术条件等）进行分析，然后着手进行编程．其内容及步骤如下：

1）零件图的工艺分析，制定数控加工工艺

包括确定毛坯，工件的定位与夹紧，使用的刀具，对刀位置，走刀路线和切削用量等。

2）基、节点计算

包括根据图纸定出零件的坐标，以数字、符号的形式描述零件的轮廓，计算出刀具相对工件的运动轨迹。

3）编写加工程序单

将上述内容，如坐标轴、方向、坐标值、进给速度、主轴转速及换刀、停车等信息用规定的代码和格式编写成程序单。

4）制作控制介质

控制介质是记录加工程序（单）上信息（代码）的载体，常用的介质有：穿孔带、穿孔卡、磁带、磁卡、开关板、拨码盘和键盘等。输入控制介质将控制介质通过机床的输入装置（如穿孔纸带通过纸带阅读机），变成电脉冲信号，将程序逐段（或全部）读入．并寄存在数控装置内运算、控制及加工。

数控装置按所寄存代码提供的数字指令，一边进行控制、运算，一边将运算结果向机床各坐标的伺服机构发出进给脉冲和控制辅助运动及动作的有关指令，驱动机床各部件运动。当有进给脉冲或指令时，相应坐标的进给驱动系统或辅助装置便产生进给和动作。最后加工出合格的零件．



12.2 数控车床的加工工艺

数控车床的加工工艺和普通车床的加工工艺大致相同，普通车床的工艺规程对零件的加工过程不必规定得很详细，一部分内容可由操作人员自行决定，如工步的安排、走刀路线、切削用量、刀具形状等；而数控车削是通过编写带有一定信息的程序来控制车床的切削，数控车床能够通过程序自动完成普通车床的加工动作，减轻了劳动者的劳动强度，同时能比较精准的加工出合格的零件。由于数控加工整个过程都是自动完成的，因此在加工零件之前就必须把整个加工过程作比较合理的安排。包括加工顺序、加工路线、切削用量、加工余量、刀具尺寸等参数的确定，不能出任何的差错，否则就会产生不良后果甚至使零件报废。

数控加工工艺设计的主要任务是为零件的加工过程中选择适合数控车床加工的内容，零件的数控车削加工工艺分析，拟定零件的数控加工工艺，填写相应的数控车削工艺文件等。数控车削加工工艺主要包括切削用量、加工余量、刀具、量具的选择，车削方法、走刀路线、车削顺序的设计等。

12.2.1 选择并确定数控加工的内容

1. 普通车床无法加工的内容

（1）由轮廓曲线构成的回转表面

（2）具有微小尺寸要求的表面

（3）同一表面采用多种设计要求的结构

（4）表面间有严格几何关系要求的表面

2. 通用机床难加工或质量难以保证的内容

（1）表面间有严格位置精度要求但在普通机床上无法一次安装加工的表面

（2）表面粗糙度要求很严的锥面、曲面、端面等对于这类表面只能采用恒线速切削才能达到要求

3. 通用机床加工效率低，工人操作劳动强度大的内容，可在数控机床尚存在富余能力的基础上进行选择。如：需要占机调整较长时间的加工内容，不能在一次安装中加工完成的其他零星部位等。

12.2.2　对零件图进行数控加工工艺分析

1. 结构工艺性分析

（1）零件结构工艺性

零件结构工艺性是指在满足使用要求前提下零件加工的可行性和经济性，即所设计的零件结构应便于加工成形并且成本低、效率高。

在不损害零件使用特性的许可范围内，更多地满足数控加工工艺的各种要求，尽可能采用适合数控加工的结构，也尽可能发挥数控加工的优越性。

（2）零件结构工艺性分析的主要内容

1）审查与分析零件图纸中的尺寸标注方法是否适应数控加工的特点

对数控加工来说，倾向于以同一基准引注尺寸或直接给出坐标尺寸。

2）审查与分析零件图纸中构成轮廓的几何元素的条件是否充分、正确

3）审查与分析在数控车床上加工时零件结构的合理性

2. 精度及技术要求分析

（1）分析精度及各项技术要求是否齐全、合理。

（2）分析本工序的数控车削加工精度能否达到图样要求，若达不到，需采取其他措施（如磨削）弥补的话，注意给后续工序留有余量。

（3）找出图样上有较高位置精度要求的表面，这些表面应在一次安装下完成。

（4）对表面粗糙度要求较高的表面，应确定用恒线速切削。

12.2.3　零件图形的数学处理及编程尺寸设定值的确定

1. 编程原点的选择

（1）将编程原点选在设计基准上并以设计基准为定位基准

（2）容易找正对刀，对刀误差小。

（3）编程方便。

（4）在毛坯上的位置能够容易、准确地确定，并且各面的加工余量均匀。

（5）对称零件的编程原点应选在对称中心。

2. 编程尺寸设定值的确定

编程尺寸设定值确定的步骤。

（1）精度高的尺寸的处理，将基本尺寸换算成平均尺寸。

（2）几何关系的处理，保持原重要的几何关系，如角度，相切等不变。

（3）精度低的尺寸的调整，通过修改一般尺寸保持零件原有几何关系，使之协调。

（4）节点坐标尺寸的计算，按调整后的尺寸计算有关未知节点的坐标尺寸。

（5）编程尺寸的修正，按调整后的尺寸编程并加工一组工件，测量关键尺寸的实际分散中心并求出常值系统性误差，再按此误差对程序尺寸进行调整并修改程序。

12.2.4 数控车削加工工艺过程的拟定

1. 数控车削加工方案的确定

（1）零件表面数控车削加工方案的确定

1）加工精度为 IT7-IT8 级、*Ra*0.8～1.6 的除淬火钢以外的常用金属，可采用普通型数控车床，按粗车、半精车、精车的方案加工。

2）加工精度为 IT5-IT6 级、*Ra*0.2～0.63 的除淬火钢以外的常用金属，可采用精密型数控车床，按粗车、半精车、精车、细车的方案加工；

3）加工精度高于 IT5 级、*Ra*<0.08 的除淬火钢以外的常用金属，可采用高档精密型数控车床，按粗车、半精车、精车、精密车的方案加工；

4）对淬火钢等难车削材料，其淬火前可采用粗车、半精车的方法，淬火后安排磨削加工；

（2）数控车削内回转表面的加工方案的确定

1）加工精度为 IT8—IT9 级、*Ra*1.6～3.2um 的除淬火钢以外的常用金属，可采用普通型数控车床，按粗车、半精车、精车的方案加工；

2）加工精度为 IT6—IT7 级、*Ra*0.2～0.63 的除淬火钢以外的常用金属，可采用精密型数控车床，按粗车、半精车、精车、细车的方案加工；

3）加工精度为 IT5 级、*Ra*<0.2 的除淬火钢以外的常用金属，可采用高档精密型数控车床，按粗车、半精车、精车、精密车的方案加工；

4）对淬火钢等难车削材料，同样其淬火前可采用粗车、半精车的方法，淬火后安排磨削加工。

2. 工序的划分

（1）数控车削加工工序的划分

1）以一次安装所进行的加工作为一道工序

2）以一个完整数控程序连续加工的内容为一道工序

3）以工件上的结构内容组合用一把刀具加工为一道工序，这样可以减少换刀次数，减少空程时间。

4）以粗、精加工划分工序

（2）回转类零件非数控车削加工工序的安排

1）零件上有不适合数控车削加工的表面，如渐开线齿形、键槽、花键表面等，必须安排相应的非数控车削加工工序。

2）零件表面硬度及精度要求均高，热处理需安排在数控车削加工之后，则热处理之后一般安排磨削加工。

3）零件要求特殊，不能用数控车削加工完成全部加工要求，则必须安排其他非数控车削加工工序，如喷丸、滚压加工、抛光等。

4）零件上有些表面根据工厂条件采用非数控车削加工更合理，这时可适当安排这些非数控车削加工工序，如铣端面打中心孔等。

（3）数控加工工序与普通工序的衔接

数控加工工序与普通工序的衔接目的是达到相互能满足加工需要，且质量目标及技术要求明确，交接验收有依据。

3. 工序顺序的安排

（1）先加工定位面，即上道工序的加工能为后面的工序提供精基准和合适的夹紧表面。

（2）先加工平面后加工孔；先加工简单的几何形状再加工复杂的几何形状。

（3）对精度要求高，粗精加工需分开进行的，先粗加工后精加工。

（4）以相同定位、夹紧方式安装的工序，最好连续进行，以减少重复定位次数和夹紧次数。

（5）中间穿插有通用机床加工工序的要综合考虑合理安排其加工顺序。

4. 工步顺序和进给路线的确定

（1）工步顺序安排的一般原则

1）先粗后精

工步顺序安排的原则要求：粗车在较短的时间内将工件各表面上的大部分加工余量切掉，一方面提高金属切除率，另一方面满足精车的余量均匀性要求。若粗车后所留余量的均匀性满足不了精加工的要求时，则要安排半精车

2）先近后远

在一般情况下，离对刀点远的部位后加工，以便缩短刀具移动距离，减少空行程时间。

3）内外交叉

对既有内表面（内型、腔），又有外表面需加工的回转体零件，安排加工顺序时，应先进行外、内表面粗加工，后进行外、内表面精加工。

4）保证工件加工刚度原则

应先安排对工件刚性破坏较小的工步，后安排对工件刚性破坏较大的工步，以保证工件加工时的刚度要求。

5）同一把刀能加工内容连续加工原则

此原则的含义是用同一把刀把能加工的内容连续加工出来，以减少换刀次数，缩短刀具移动距离。

（2）进给路线的确定

进给路线是指数控机床加工过程中刀具相对零件的运动轨迹和方向，也称走刀路线。包括切削加工的路径及刀具切入、切出等非切削空行程。它不但包括子工步的内容，也反映出工步顺序

1）确定进给路线的主要原则

A. 首先按已定工步顺序确定各表面加工进给路线的顺序；

B. 所定进给路线应能保证工件轮廓表面加工后的精度和粗糙度要求；

C. 寻求最短加工路线（包括空行程路线和切削路线），减少行走时间以提高加工效率；

D. 要选择工件在加工时变形小的路线，对横截面积小的细长零件或薄壁零件应采用分几次走刀加工到最后尺寸或对称去余量法安排进给路线。

2）粗加工进给路线的确定

A. 常用的粗加工进给路线“矩形”循环进给路线；“三角形”循环进给路线；沿轮廓形状等距线循环进给路线；阶梯切削路线。

B. 最短的粗加工切削进给路线

切削进给路线为最短，可有效地提高生产效率，降低刀具的损耗等。

3）精加工进给路线的确定

A. 完工轮廓的进给路线

零件的完工轮廓应由最后一刀连续加工而成，尽量不要在连续的轮廓中安排切入和切出或换刀及停顿，以免因切削力突然变化而造成弹性变形，致使光滑连接轮廓上产生表面划伤、形状突变或滞留刀痕等缺陷。

B. 换刀加工时的进给路线

主要根据工步顺序要求决定各刀加工的先后顺序及各刀进给路线的衔接。

C. 切入、切出及接刀点位置的选择

应选在有空刀槽或表面间有拐点、转角的位置安排切入、切出点。

D. 各部位精度要求不一致的精加工进给路线

若各部位精度相差不是很大时，应以最严的精度为准，连续走刀加工所有部位精度相差很大，则精度接近的表面安排在同一把刀走刀路线内加工，并先加工精度较低的部位，最后再单独安排精度高的部位的走刀路线。

12.2.5 切削用量的选择

数控车削加工的切削用量包括：背吃刀量、主轴转速或切削速度（用于恒线速切削）、进给速度或进给量

1. 背吃刀量的确定

背吃刀量是根据余量确定的。在工艺系统刚性和机床功率允许的条件下，尽可能选取较大的背吃刀量，以减少进给次数。

半精车余量一般为0.5mm左右，所留精车余量一般比普通车削时所留余量少，常取0.1~0.5mm。

2. 主轴转速的确定

（1）车外圆时主轴转速

车外圆时主轴转速应根据零件上被加工部位的直径，并按零件和刀具的材料及加工性质等条件所允许的切削速度来确定。交流变频调速数控车床低速输出力矩小，因而切削速度不能太低。

（2）车螺纹时主轴转速

在车削螺纹时，车床的主轴转速将受到螺纹的螺距（或导程）大小、驱动电动机的升降频特性及螺纹插补运算速度等多种因素影响，故对于不同的数控系统，推荐不同的主轴转速选择范围。

3. 进给速度的确定

进给速度是指在单位时间内，刀具沿进给方向移动的距离（单位为mm/min）。有些数控车床规定可以选用进给量（单位为mm/r）表示进给速度。

（1）当工件的质量要求能够得到保证时，为提高生产率，可选择较大的进给速度。

（2）切断、车削深孔或精车削时，宜选择较低的进给速度。

（3）刀具空行程，特别是远距离“回零”时，可以设定尽量高的进给速度。

（4）进给速度应与主轴转速和背吃刀量相适应。

数控车削加工的切削用量可以参照表 12－1 进行选择。

表 12－1　车削用量参考值

工件材料	刀具材料	a_p=0.38~0.13（mm）	a_p=2.4~0.38（mm）	a_p=4.7~2.4（mm）	a_p=9.5~4.7（mm）
		f=0.13~0.05（mm/r）	f=0.38~0.13（mm/r）	f=0.76~0.38（mm/r）	f=1.3~0.76（mm/r）
		v（m/min）			
低碳钢 低碳合金钢	高速钢	——	70~90	45~65	20~40
	硬质合金	215~365	165~215	120~165	90~120
中碳钢 中碳合金钢	高速钢	——	45~60	30~40	15~20
	硬质合金	130~165	100~130	75~100	55~75
灰铸铁	高速钢	——	35~45	25~35	20~25
	硬质合金	135~185	105~135	75~105	60~75
黄铜或青铜	高速钢	——	85~105	70~85	45~70
	硬质合金	215~415	185~215	150~185	120~150
铝合金	高速钢	105~150	70~105	45~70	30~45
	硬质合金	215~300	135~215	90~135	60~90

12.2.6　编写数控车削工艺文件

数控加工专业技术文件是数控加工工艺设计过程中需要完成的，这些专业技术文件既是编写数控加工程序的重要依据，也是需要机床操作者遵守、执行的规则。有的则是加工程序的具体说明，目的是让操作者更加明确程序的内容、安装与定位方式、各个加工部位的刀具及其他问题。下面介绍几种数控加工专用技术文件，以供参考。

1. 数控加工工序卡片

数控加工工序卡片（如表 12－2 所示）与普通加工工序卡片有许多相似之处，是机床操作人员进行数控加工的主要指导性工艺资料。工序卡应该按照已确定的工艺路线填写。它主要包括工序顺序、工步内容、各工步所用刀具和切削用量等。当工序内容十分复杂时，也可把工序简图画在工序卡片上。

表 12-2 加工工序卡

<table>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">××单位</td><td colspan="7" rowspan="2">数控加工工序卡</td><td colspan="4">产品名称和代号</td><td colspan="2">零件名称</td><td colspan="2">零件图号</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td><td colspan="2"></td><td colspan="2">×××</td></tr>
<tr><td colspan="2">工艺序号</td><td colspan="4">程序编号</td><td colspan="7">夹具名称</td><td colspan="2">夹具编号</td><td>使用设备</td><td>车间</td></tr>
<tr><td colspan="2">×××</td><td colspan="4">×××</td><td colspan="7">三爪自定心卡盘</td><td colspan="2">×××</td><td>数控车床</td><td>×××</td></tr>
<tr><td>工步号</td><td colspan="3">工步内容</td><td colspan="4">刀具号</td><td colspan="3">刀具规格</td><td colspan="3">主轴转速
(r/min)</td><td>进给速度
(mm/r)</td><td>被吃刀量
(mm)</td><td>备注</td></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="3"></td><td colspan="4"></td><td colspan="3"></td><td colspan="3"></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="3"></td><td colspan="4"></td><td colspan="3"></td><td colspan="3"></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>……</td><td colspan="3"></td><td colspan="4"></td><td colspan="3"></td><td colspan="3"></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>编制</td><td colspan="2">×××</td><td colspan="2">审核</td><td colspan="2">×××</td><td colspan="3">批准</td><td colspan="2">×××</td><td colspan="2">年月日</td><td>共 页</td><td colspan="2">第 页</td></tr>
</table>

2. 数控加工程序说明卡

(1) 所用数控设备型号及控制机型号;

(2) 程序原点、对刀点及允许的对刀误差;

(3) 工件相对于机床的坐标方向及位置 (用简图表述);

(4) 镜像加工使用的对称轴;

(5) 所用刀具的规格、图号及其在程序中对应的刀具号 (如: D03 或 T0101 等), 必须按实际刀具半径或长度加大或缩小补偿值的特殊要求 (如用同一条程序、同一把刀具利用加大刀具半径补偿值进行粗加工), 更换该刀具的程序段号等;

(6) 整个程序加工内容的顺序安排, 使操作者知道先干什么后干什么;

(7) 子程序说明, 对程序中编入的子程序应说明其内容, 使操作者知晓每条子程序的功用;

(8) 其他需要作特殊说明的问题。

3. 数控加工走刀路线图

在数控加工中, 常常要注意并防止刀具在运动中与夹具、工件等发生意外的碰撞, 为此, 必须设法告诉操作者关于程编中的刀具运动路线。

4. 数控车削加工刀具调整图

(1) 本工序所需刀具的种类、形状、安装位置、预调尺寸和刀尖圆弧半径等。

(2) 刀位点。若以刀具尖点为刀位点时, 则刀具调整图中 X 向和 Z 向的预调尺寸终止线交点即为该刀具的刀位点。

(3) 工件的安装方式及待加工部位。

(4) 工件的坐标原点。

(5) 主要尺寸的程序设定值。

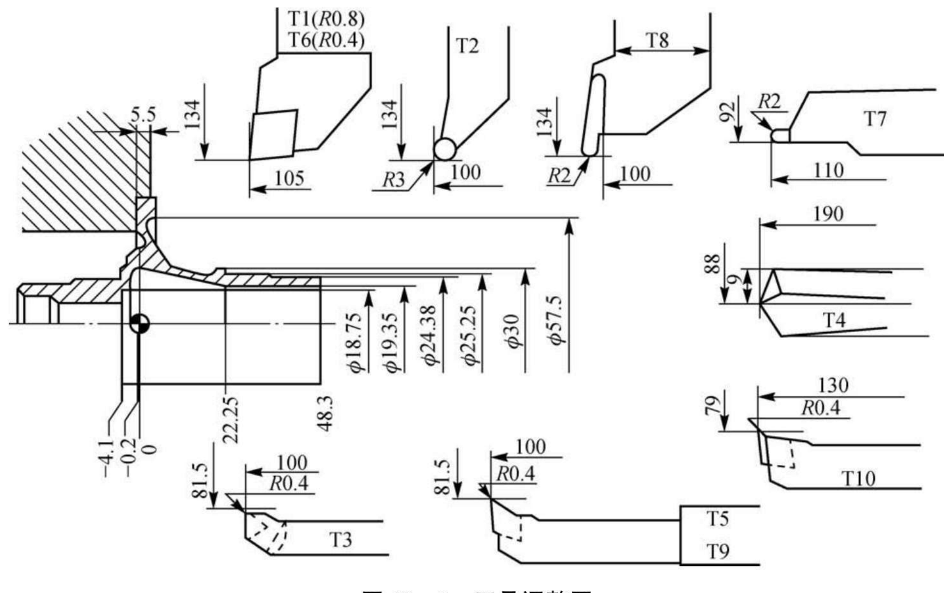


图 12－1　刀具调整图

5. 数控加工刀具卡片

数控加工刀具卡片（如表 12－3 所示）是组装刀具和调整刀具的依据。内容包括刀具号、刀位号、刀具规格名称、加工表面、刀补数据等。机床操作人员应根据刀具卡片准备好刀具，如果是在车削中心上操作，应将每把刀放入相应的刀位中。

表 12－3　刀具卡片

产品名称		×××	零件名称	×××	零件图号	×××
序号	刀具号	刀具规格、名称	数量	加工表面	刀尖半径	备注
1						
2						
3						
……						
编制	×××	审核　×××	批准	×××	共页	第页

6. 数控加工程序单

数控加工程序单的形成有两种，一是编程员根据工艺分析结果，经过数据计算，按照机床的指令代码编制；二是使用 CAM 软件对三维零件模型进行分析和计算，产生加工路径，然后经后置处理器生成加工程序。数控加工程序包含了加工过程中所有的工艺信息、位移数据、机床开关动作指令，是人与机床进行交流的最重要文件。不同的数控机床、不同的数控系统，程序单的格式是不一样的。仅用加工程序单来进行实际加工是不够的，还必须对程序单进行详细的说明。一般对程序需要说明以下几点，所使用的数控设备型号及控制系统型号；对刀点及允许的对刀误差；工件的安装方向和大致位置；在换刀程序段上注明所使用刀具类型和规格。

7. 数控加工专用技术文件的编写要求

(1) 字迹工整、文字简练达意。
(2) 加工图清晰、尺寸标注准确无误。
(3) 应该说明的问题要全部说得清楚、正确。
(4) 文图相符、文实相符，不能互相矛盾。
(5) 当程序更改时，相应文件要同时更改，须办理更改手续的要及时办理。
(6) 准备长期使用的程序和文件要统一编号，办理存档手续，建立借阅（借用）、更改、复制等管理制度。

12.2.7 首件试加工与现场问题处理

根据实测结果和现场问题处理方案对所定工艺及所编程序进行修正，直至满足零件技术要求为止。



12.3 数控车床编程基础

12.3.1 程序的组成与格式

程序：根据被加工零件图纸的形状大小、技术要求、工艺要求等切削加工的必要信息，按数控系统所规定的指令和格式编制的数控加工指令序。一个完整的程序由程序号、程序内容和程序结束三部分组成。

程序号：数控系统不同程序号的表示略有不同，FANUC 系统程序号的书写格式为 O××××。从 O0000 到 O9999，写在程序的最前面，须单独占一行。

程序内容：程序内容是整个加工程序的核心，由许多程序段组成，每个程序段由一个或多个指令构成，它表示数控机床中除了程序结束外的全部动作。

程序结束：写在程序的最后，通常为 M02 或者 M30，单独占一行。

数控程序由若干个程序段组成的，每个程序段由按照一定顺序和规定排列的“字”组成。“字”是由表示地址的英文字母、特殊文字和数字集合而成，表示某一功能的代码符号。如 F20 为一个字，表示进给速度为 20。

程序段由顺序号字、准备功能字、尺寸字、进给功能字、主轴功能字、刀具功能字、辅助功能字和程序结束符组成。此外，还有暂停、子程序调用等。每个字都由字母开头，称为“地址”。FUNUC Oi Mate 数控系统常用地址符及其含义如表 12-4 所示。

12.3.2 坐标系

数控车床坐标系分为机床坐标系和工件坐标系（编程坐标系）。以机床原点为坐标系原点建立起来的 X、Z 轴直角坐标系，称为机床坐标系。车床的机床原点一般为主轴旋转中心与卡盘后端面的交点，机床原点在机床出厂时已设定。机床坐标系是制造和调整机床的基础，也是设置工件坐标系的基础，一般不允许随意改动。操作者在机床通电后执行手动返回参考点设定机床坐标系。

数控编程时应该首先确定工件坐标系和工件原点。将零件在设计中的设计基准与

加工过程中的工艺基准统一，该统一的基准点通常称为工件原点。以工件原点为坐标原点建立起来的 *X*、*Z* 轴直角坐标系，称为工件坐标系。在车床上工件原点可以选择在工件的左或右端面上，即工件坐标系是将参考坐标系通过对刀得到的。

表 12-4　FUNUC Oi Mate 数控系统常用地址符及其含义

功能	地址	意义
程序名	O	程序号指定
程序号	N	顺序号指定
准备功能	G	运动方式（直线、圆弧、螺纹）指定
坐标（尺寸）字	X、Z、U、W	坐标轴移动量指定
	R	圆弧半径指定
	I、K	圆弧中心坐标（矢量）指定
进给功能	F	进给速度、螺纹导程（螺距）指定
主轴功能	S	主轴转速指定
刀具功能	T	刀具号、刀补号的指定
辅助功能	M	控制机床各种辅助动作及开关状态
暂停	P、U、X	暂停时间的指定
子程序调用	P、L	调用子程序号与调用子程序次数指定
结束符	;	程序段结束指定

12.3.3　参考点

参考点是机床上的一个固定点。该点是刀具退离到一个固定不变的极限点，其位置由机械挡块或行程开关来确定。以参考点为原点，坐标方向与机床坐标系方向相同建立的坐标系称为参考坐标系，在实际使用中通常是以参考坐标系计算坐标值。机床通电后，可采用手动返回参考点。

12.3.4　数控加工编程方式

数控车床的编程分为绝对编程、增量编程和混合编程。绝对编程是指程序段中的坐标点值均是相对于坐标原点来计算的。增量（相对）编程是指程序段中的坐标点值是相对于上一点来计算的。混合编程方式是指允许在同一程序段中混合使用绝对和相对编程方法，编程时一般用 *X*、*Z* 表示绝对坐标编程，用 *U*、*W* 表示相对坐标编程。

直径编程与半径编程，当地址 *X* 后所跟的坐标值是直径时，则称为直径编程；当地址 *X* 后所跟的坐标值是半径时，称半径编程，通常系统默认为直径编程。

12.3.5　程序代码

1. 准备功能字

使机床或控制系统建立加工功能方式的命令。是以大写字母 G 加上两位数字组成（G00~G99），俗称 G 代码或 G 指令，用于指定数控装置在程序段内准备某种功能。准

备功能字有 ISO 和 EIA 两种国际上通用的格式。FANUC 和 SIEMENS 的数控系统都采用 G 代码编程。G 功能是基本的数控指令代码。FUNUC Oi Mate 数控系统的 G 代码功能及用途如表 12－5 所示。

表 12－5　FUNUC Oi Mate 数控系统的 G 代码功能及用途

G 代码	组	功能	G 代码	组	功能
* G00	01	定位（快速移动）	G57	14	选择工件坐标系 4
G01		直线切削	G58		选择工件坐标系 5
G02		圆弧插补（CW，顺时针）	G59		选择工件坐标系 6
G03		圆弧插补（CCW，逆时针）	G70	00	精加工循环
G04	00	暂停	G71		内外径粗切循环
G09		停于精确的位置	G72		端面粗切循环
G20	06	英制输入	G73		成形重复循环
G21		公制输入	G74		Z 向进给钻削
G22	04	内部行程限位有效	G75		X 向切槽
G23		内部行程限位无效	G76		切螺纹循环
G27	00	检查参考点返回	* G80	10	固定循环取消
G28		参考点返回	G83		钻孔循环
G29		从参考点返回	G84		攻丝循环
G30		回到第二参考点	G85		正面镗循环
G32	01	切螺纹	G87		侧钻循环
* G40	07	取消刀尖半径偏置	G88		侧攻丝循环
G41		刀尖半径偏置（左侧）	G89		侧镗循环
G42		刀尖半径偏置（右侧）	G90		(内外直径）切削循环
G50	00	主轴最高转速设置（坐标系设定）	G92	01	切螺纹 Z 环
G52		设置局部坐标系	G94		(台阶）切削循环
G53		选择机床坐标系	G96	12	恒线速度控制
* G54	14	选择工件坐标系 1	* G97		恒线速度控制取消
G55		选择工件坐标系 2	G98	05	指定每分钟移动量
G56		选择工件坐标系 3	* G99		指定每转移动量

2. 坐标功能字

坐标功能字是给定机床各坐标轴位移量和方向，由各坐标轴的地址代码及数字组成。坐标功能字一般安排在 G 功能字的后面，如 G00X50Z50 等。

3. 进给功能字

表示刀具相对于工件的运动速度。由 F 和其后几位数字组成。单位有 mm/min，

mm/r 两种。

4. 主轴转速功能字

主轴转速功能字，用以设定主轴速度，由 S 和其后的几位数字组成，S 后的数字表示主轴转速，单位为 r/min；当主轴在恒线速度指定时，单位为 m/min。

5. 刀具功能字

在更换刀具时用来指定刀具号和刀具补偿。由 T 和其后的几位数字组成。

6. 辅助功能字

用来指定主轴的启停，冷却液通断等规定的辅助功能，由 M 和其后两位数字组成。常用的辅助功能 M 代码含义及用途如表 12－6 所示。

表 12－6　FUNUC Oi Mate 数控系统的辅助功能及用途

代码	功能
M30	程序结束复位
M03	主轴正转
M04	主轴反转
M05	主轴停
M98	子程序调用
M99	子程序结束

7. 程序段结束符

每一个程序段结束之后，都应加上程序段结束符。在 FANUC 系统中，用“;”来表示程序段结束。

12.3.6　加工基本指令

1. 快速定位 G00

指令格式：G00 X（U）____Z（W）____；

功能：把刀具从当前位置移动到由绝对或相对指令指定的位置，在绝对指令中用终点坐标值编程，在相对指令中用刀具移动的距离编程。如图 12－2 所示。

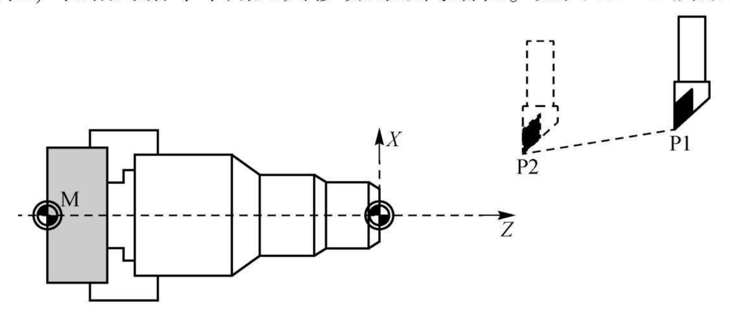


图 12－2　G00 指令刀具移动示意图

注意：

G00 一般用于加工前快速定位或加工后快速退刀。

G00 指令中的快速速度由机床参数“快速进给速度”对各轴分别设定，所以快速移动速度不能在程序段中用 F 进行限制，但可由面板上的快速修调按钮修正。

在执行 G00 时，由于各轴以各自的速度移动，不能保证各轴同时到达终点，因此联动直线轴的合成轨迹不一定是直线，操作者必须格外小心，以免刀具与工件发生碰撞。

2. 直线插补 G01

指令格式：G01 X（U）____Z（W）____F____；G01 指令使刀具以一定的进给速度，从刀具所在点出发，直线移动到目标点，如图 12－3 所示。

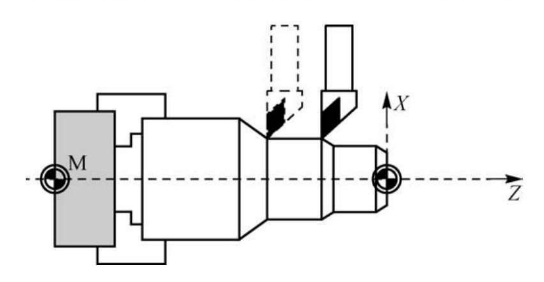


图 12－3　G01 指令刀具移动示意图

X，*Z* 后的数值表示目标点的绝对坐标值。*U*，*W* 后的数值表示目标点的增量坐标值（如图 12－4 所示）。例如刀具移动路径为 *A*→*B*→*C*，则加工程序为：

G01 X50Z75F0.2；

X100；

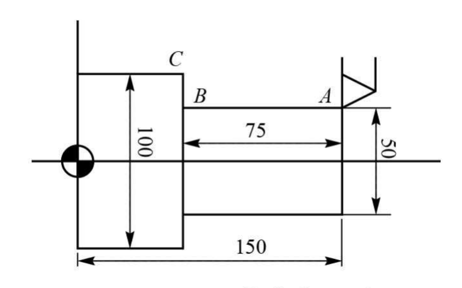


图 12－4　G01 指令应用实例

3. 顺/逆时针圆弧插补 G02/G03

刀具进行圆弧插补时，必须规定圆弧所在的平面，沿垂直于圆弧所在平面的坐标轴由正方向向负方向观察，来判别圆弧的顺、逆时针方向。顺时针 G02；逆时针 G03。如图 12－5 所示。

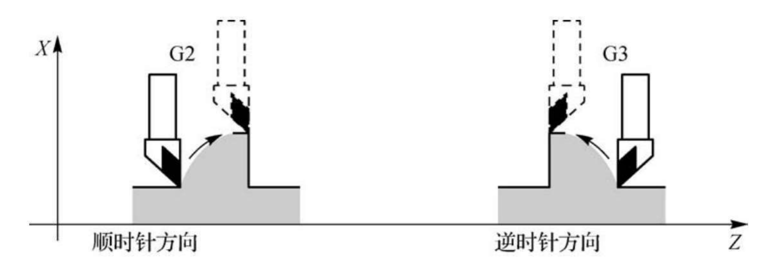


图 12－5　G02/G03 指令刀具移动示意图

指令格式：G02（G03）X（U）＿＿Z（W）＿＿I＿＿K＿＿F＿＿；

G02（G03）X（U）＿＿Z（W）＿＿R＿＿F＿＿；

X，*Z* 后数字表示圆弧终点坐标值；*U*，*W* 后的数字表示起点与终点之间的相对坐标；*I*，*K* 表示圆弧起点到圆弧圆心点的增量坐标；*R* 表示圆弧半径。

G02/G03 指令应用实例举例如图 12－6 所示。

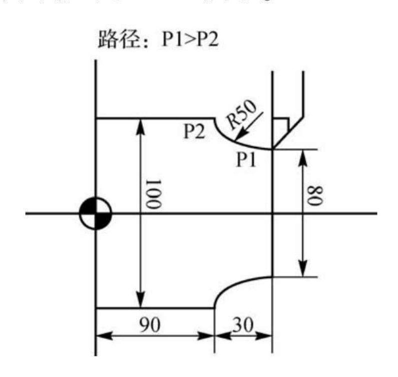


图 12－6　圆弧插补 G02/G03 指令应用实例

G02 X100 Z90 I50 K0F0. 2；

或　G02 X100　Z90 R50 F0. 2。

12. 3. 7　数控车简化编程及应用

1. 单一切削循环指令 G90

直线切削循环指令格式：G90X（U）＿＿Z（W）＿＿F＿＿；

每执行一个 G90 指令，刀具完成如图 12－7 所示，1→2→3→4 路径的循环操作。U 和 W 的正负号（+/-）在增量坐标程序里是根据 1 和 2 的方向改变的。

锥面切削循环指令格式：G90X（U）＿＿Z（W）＿＿R＿＿F＿＿；

R 表示切削起点到切削终点的半径之差，必须指定锥面的“*R*”值。切削功能的用法与直线切削循环类似。

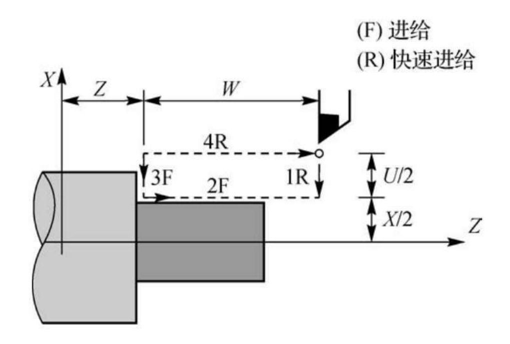


图 12－7　G90 指令刀具移动示意图

2. 螺纹固定循环指令 G92

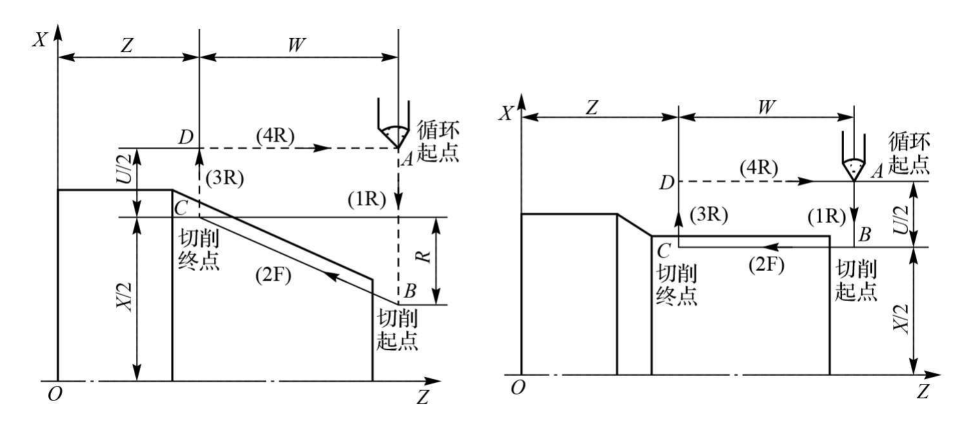
指令格式

圆柱螺纹的编程格式为：G92X（U）＿＿Z（W）＿＿F＿＿；锥螺纹的编程格式

为：G92X（U）____Z（W）____R____F____；

其中，X、Z 为螺纹终点绝对坐标值，U、W 为螺纹终点相对循环起点的增量值，R 为锥螺纹始点与起点的半径差，F 螺纹导程。

刀具从循环起点开始按梯形循环，最后又回到循环起点。如图 12－8 所示，刀具路径中 A 到 B、C 到 D、D 到 A 为快速移动，B 到 C 为进给运动。



（a）G92 螺纹加工走刀路线（锥螺纹）　（b）G92 螺纹加工走刀路线（圆柱螺纹）

图 12－8　固定循环切削螺纹的走刀线路图

3. 轴向切削粗车循环指令 G71

指令格式：

G71U（△d）R（e）

G71P（ns）Q（nf）U（△u）W（△w）F（f）S（s）T（t）

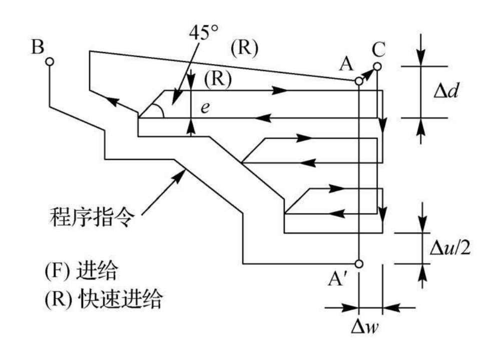


图 12－9　轴向切削粗车循环走刀线路图

刀具切削路线如图 12－9 所示。

N（ns）……
………
F_ _
S_ _ T_ _
N（nf）……

从顺序号 ns 到 nf 的程序段，指定 A 及 B 间的移动指令。

△d：切削深度（半径指定）

不指定正负符号。切削方向依照 AA′的方向决定，在另一个值指定前不会改变。

e：退刀行程　本指定是状态指定，在另一个值指定前不会改变。

ns：精加工形状程序的第一个段号。

nf：精加工形状程序的最后一个段号。

△U：X 方向精加工预留量的距离及方向。(直径/半径)

△W：Z 方向精加工预留量的距离及方向。

f，s，t：包含在 ns 到 nf 程序段中的任何 F，S 或 T 功能在循环中被忽略，而在 G71 程序段中的 F，S 或功能有效。

功能：如果在上图用程序决定 A 至 A′至 B 的精加工形状，用△d（切削深度）切掉指定的区域，留精加工预留量△u/2 及△w。

4. 端面粗车复合循环指令 G72

指令格式：

G72W（△d）R（e）

G72P（ns）Q（nf）U（△u）W（△w）F（f）S（s）T（t）

△d，e，ns，nf，△u，△w，f，s 及 t 的含义与 G71 相同。走刀路线如图 12－10 所示。

指令功能：端面粗车循环指令 G72 也是一种复合循环指令，与 G71 所不同的是该指令适合于 Z 向余量小、X 向余量大的回转体零件粗加工，所加工的零件同样要符合 X 轴、Z 轴方向同时单调增大或单调减小的特点。

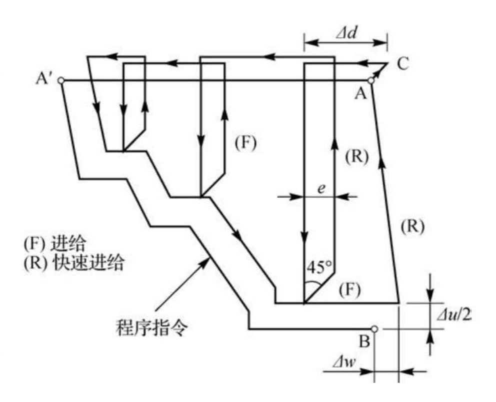


图 12－10　端面粗车复合循走刀线路图

5. 封闭切削复合循环指令 G73

指令格式：

G73U（△i）W（△k）R（d）

G73P（ns）Q（nf）U（△u）W（△w）F（f）S（s）T（t）

N（ns）…
…………
F_ _
S_ _
T_ _
N（nf）…

（以上各行）A 和 B 间的运动指令指定在从顺序号 ns 到 nf 的程序段中

△i：X 轴方向退刀距离（半径指定）；△k：Z 轴方向退刀距离（半径指定）。

d：分割次数；这个值与粗加工重复次数相同。

ns：精加工形状程序的第一个段号；nf：精加工形状程序的最后一个段号。

△U：X 方向精加工预留量的距离及方向。(直径/半径)

△W：Z 方向精加工预留量的距离及方向。

f，s，t：顺序号“ns”到“nf”程序段中的任何 F，S 或 T 功能在循环中被忽略，而在 G73 程序段中的 F，S 或功能有效。

功能：利用该循环，可以按同一轨迹重复切削，每次切削刀具向前移动一次，这种循环方式大多对锻造和铸造等前序加工做成的有基本形状的毛坯或已粗车成型的工件进行切削，走刀线路如图 12－11 所示。

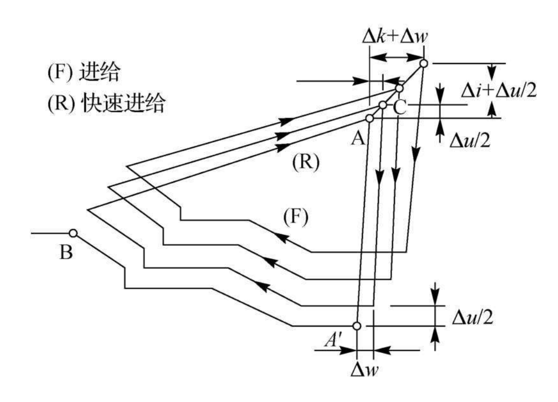


图 12－11　封闭切削复合循环走刀线路图

6. 精加工循环 G70

指令格式：

G70 P（ns）Q（nf）

ns：精加工形状程序的第一个段号；nf：精加工形状程序的最后一个段号，由 G71、G72、G73 进行粗切削循环完成后，可用 G70 指令调用精加工程序段进行加工。



12.4　数控车床（FANUC Oi Mate 系统）操作

12.4.1　数控车床（C2-6136HK）简介

C2-6136HK 数控车床是重庆第二机床公司生产的普及型数控车床。该机床配置 FANUC Series Oi Mate-TC 数控系统、交流伺服驱动系统、主轴无级调速、自动润滑系统、四工位自动刀架、半封闭防护。机床具有加工精度高、效率高、劳动强度低、维护方便、运行平稳、安全可靠等特点。C2-6136HK 为两坐标 CNC 数控车床，采用伺服电机数字控制系统，可以完成切削直线、斜线、圆弧、螺纹（公/英制）等复杂工序。适用于加工形状复杂、精度较高，单件、中小批量生产的盘盖类及轴套类零件。

2. 面板介绍：

C2-6136HK 数控车床面板由系统面板和控制面板两部分组成，控制面板上安装有主轴负载表及控制器电源通断等各种按钮，指示灯及操作部件，系统面板主要由程序录入、编辑及相关功能程序对应操作的按钮。系统面板和控制面板结构图如图 12－12、图 12－13 所示，相关按钮功能与作用由表 12－7、表 12－8 加以说明。

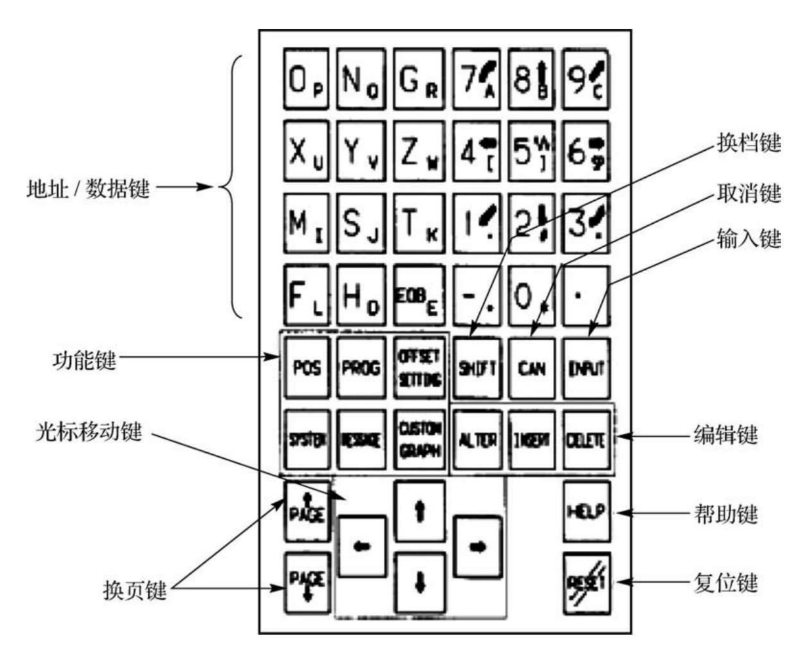


图 12－12　FANUC Oi Mate 系统系统面板

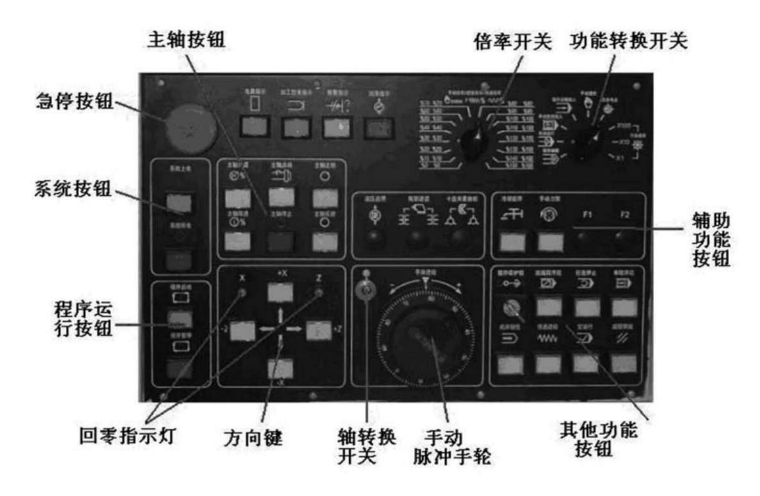


图 12－13　FANUC Oi Mate 系统控制面板

表 12－7　机床面板功能介绍

项　目	作　用
急停按钮	当出现意外时，按下此按钮，机床立即停止工作。该按钮被按下时，它是自锁的，顺时针旋转后即可释放
系统按钮	机床电源打开后，给数控系统通电（包括上电和断电）
程序运行	程序的执行和停止，当加工程序准备好后（功能开关处在手动数据输入或自动运行位置）对该程序的执行或停止。
回零指示灯	开机回参考点时，X 轴和 Z 轴到位提示。该指示灯亮否，意味着回到位否

续表

项　目	作　用
方向键	执行 X 轴的正、负向和 Z 轴的正、负向移动，此按钮一般配合回参考点、手动运行、手动脉冲功能使用
轴转换按钮	在手动脉冲功能下，用手动脉冲手轮执行刀具轴向移动时 X 轴和 Z 轴的切换
手动脉冲手轮	在手动脉冲功能下，执行刀具在 X 轴或 Z 轴的移动
主轴按钮	主轴按钮包含主轴的正转、反转、停止、点动、升速、降速六个按钮。在执行该功能时，功能开关应处在手动运行位置，且之前应在手动数据输入功能下利用程序完成主轴的转动
倍率开关	该开关控制刀具在移动时速率的增加或降低。
功能开关	手动脉冲：有 3 档速度，与手动脉冲手轮配合使用 回参考点：开机后要做的第一件事，使机床坐标和工件坐标统一 手动运行：与轴向移动按钮配合使用 远程输入：跟计算机联网时数据的传输 手动数据输入：编制简单的程序（最多 10 行） 自动运行：选择工件要用的程序后，按程序启动按钮执行加工操作 程序编辑：对加工程序的输入、编辑、调用等操作
单段运行	单段执行程序，“程序启动”按键每按一次，执行一个语句
空运行	程序很快运行，原设定的走刀速度无效，都是以 G00 速度执行，以达到快速调试程序用。
机床锁定	锁住机床的各轴，使之不动，执行程序时，只是位置的显示不断变化，主要用于程序调试的程序预演
程序保护	取下钥匙时，系统里的程序将不能做任何改动
手动刀架	在手动运行功能状态下，按下此键，将执行换刀动作

表 12－8　机床面板功能介绍

操作项目	操作方法
开机	打开空气开关（电源）——打开机床左侧面的——电源开关——系统上电
关机	系统断电——关闭电源开关——关闭空气开关
回零	功能键旋到回参考点——+X——+Z
超程解除	解除急停——手动运行或手脉运行——同时按下超程解除和+X 或－X 或+Z 或-Z
急停、复位	危险或紧急时——急停——解除危险后顺时针旋转打开急停——复位——回参考点
手脉进给	手脉运行——100%或 10%或 1%——手脉手轮——转换手轮（X 或 Z）
点动操作	手动运行——倍率开关（选择倍率）——选择坐标+X 或－X 或+Z 或-Z
手动换刀	手动运行——观察当前刀的位置后按下手动换刀

续表

操作项目	操作方法
对刀操作	1. 用外圆车刀先试切一外圆，仅在 Z 轴上退刀，停止主轴，测量外圆直径后，按系统面板上 OFSET——补正——形状——将光标移动到所要对的刀具的 X 轴上，输入刚刚测得的外圆直径值 XD——测量，即输入到刀具几何形状里。 2. 用外圆车刀再试切外圆端面，仅在 X 轴上退刀，停止主轴，按 OFSET——补正——形状——将光标移动到所要对的刀的 Z 轴上，输入值 Z0——测量，即输入到刀具几何形状里
程序编辑	功能键旋到程序编辑——系统面板上的 PROG——打开程序保护——进入系统程序编辑操作（选择程序、新录程序、修改程序等）
程序单段运行	功能键旋到自动运行——单段运行——程序启动
程序自动运行	功能键旋到自动运行——程序启动——加工结束
刀补数据设置	功能键旋到手动运行——系统面板上的 OFSET——补正——刀补——输入刀补值



12.5　数控车削加工的综合实例

12.5.1　零件介绍

加工如图 12－14 所示的零件。技术要求如下：

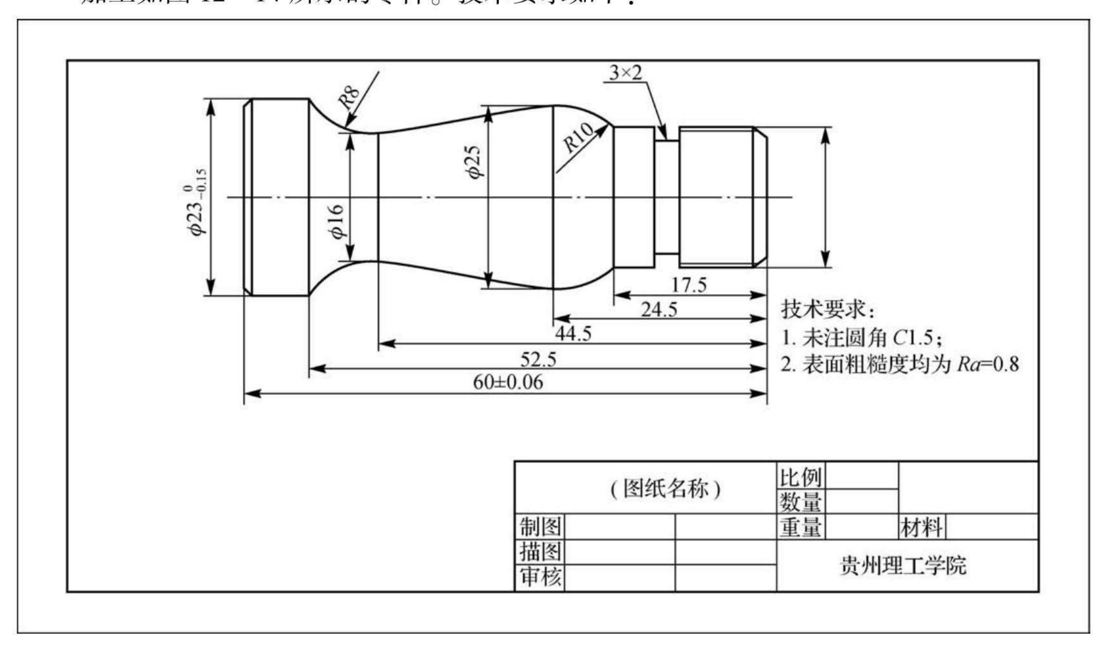


图 12－14　加工零件图

1. 毛坯：直径为 32 的硬铝棒料；

2. 工件外圆分粗、精车，精车余量在 X 轴方向为 0.4mm，粗车时被吃刀量 1.5mm，退刀量 3mm；

3. 粗牙普通螺纹的小径尺寸为 M20：18mm，用螺纹车刀中速五次进给车削；

4. 刀具：1—90°外圆车刀；2—尖刀；3—切槽刀，刀宽为 3. 3mm；4—60°螺纹车刀。粗车精车采用同一把刀具。

12. 5. 2 工艺分析

1. 该零件为含有螺纹、退刀槽、圆弧及倒角的回转类零件，且尺寸不呈线性变化；

2. 该回转零件的轴向、径向尺寸均完整，零件的最大长度为 60，径向最大尺寸为 Φ28 且轴向以总长度尺寸 60±0. 06 精度要求最高，而直径方向尺寸则以 Φ28 尺寸精度要求最高。

3. 由技术要求可知，该零件的毛坯为棒料，尺寸不呈线性变化，所以可以选择封闭切削复合循环指令 G73 对该零件进行粗车复合循环加工。

12. 5. 3 刀具选择

根据零件的技术要求，选择刀具及参数如表 12－9 所示。

表 12－9　数控加工刀具卡

<table>
<tr><td>序号</td><td>刀具号</td><td colspan="2">刀具规格、名称</td><td>数量</td><td colspan="2">加工表面</td><td>刀尖半径</td><td>备注</td></tr>
<tr><td>1</td><td>T0101</td><td colspan="2">90 度外圆车刀</td><td>1</td><td colspan="2">车削端面</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td>T0202</td><td colspan="2">尖刀</td><td>1</td><td colspan="2">粗精车轮廓表面</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td>T0303</td><td colspan="2">3. 3mm 切槽刀</td><td>1</td><td colspan="2">车削退刀槽、切断</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>4</td><td>T0404</td><td colspan="2">60 度三角螺纹车刀</td><td>1</td><td colspan="2">车螺纹</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>编制</td><td>×××</td><td>审核</td><td>×××</td><td>批准</td><td>×××</td><td>共页</td><td colspan="2">第页</td></tr>
</table>

12. 5. 4 夹具选择

此零件加工选用车床上常用的三爪自定心卡盘，无须掉头。确定加工顺序及进给路线：平端面——粗、精加工外轮廓——倒角——切退刀槽——车螺纹——切断。按单件小批量生产进行编程，进给路线设计不必考虑最短进给路线或最短空行程路线，轮廓表面车削进给路线可用复合循环指令 G73 进行简化编程。

12. 5. 5 切削用量的选择

根据相关技术要求，选择的切削用量如表 12－10 所示。

表 12－10　切削用量选择

<table>
<tr><td rowspan="2">实训中心</td><td colspan="2" rowspan="2">数控加工工序卡</td><td colspan="2">产品名称和代号</td><td colspan="2">零件名称</td><td>零件图号</td></tr>
<tr><td colspan="2">×××</td><td colspan="2"></td><td>×××</td></tr>
<tr><td>工艺序号</td><td colspan="2">程序编号</td><td colspan="2">夹具名称</td><td>夹具编号</td><td>使用设备</td><td>车间</td></tr>
<tr><td>×××</td><td colspan="2">×××</td><td colspan="2">三爪自定心卡盘</td><td>×××</td><td>数控车床</td><td>×××</td></tr>
<tr><td>工步号</td><td>工步内容</td><td>刀具号</td><td>刀具规格</td><td>S</td><td>F</td><td>ap</td><td>备注</td></tr>
<tr><td>1</td><td>车端面</td><td>T0101</td><td>90 度外圆刀</td><td>600</td><td>0. 2</td><td></td><td></td></tr>
</table>

续表

工步号	工步内容		刀具号	刀具规格	S	F	ap	备注
2	粗车外表面		T0202	尖刀	600	0.3	4	
3	精车外表面		T0202	尖刀	1000	0.08	0.4	
4	倒角		T0101	90 度外圆刀	600	0.2		
5	切退刀槽		T0303	切槽刀	400	0.1		
6	车螺纹		T0404	螺纹刀	500	1.5	5 次进给	
7	切断		T0303	切槽刀	400	0.1		
编制	×××	审核	×××	批准	×××	年 月 日	共 页	第 页

12.5.6　程序编制

1. 建立工件坐标系（编程坐标系），坐标原点选在零件右端面的中心线上
2. 计算基点的坐标值（略）
3. 编写加工程序
4. 程序的输入及校验
5. 零件的加工
6. 零件的质量分析
7. 检测加工出来的零件精度是否达到要求，若达不到要求，则更改加工参数重新加工，直到加工出合格零件

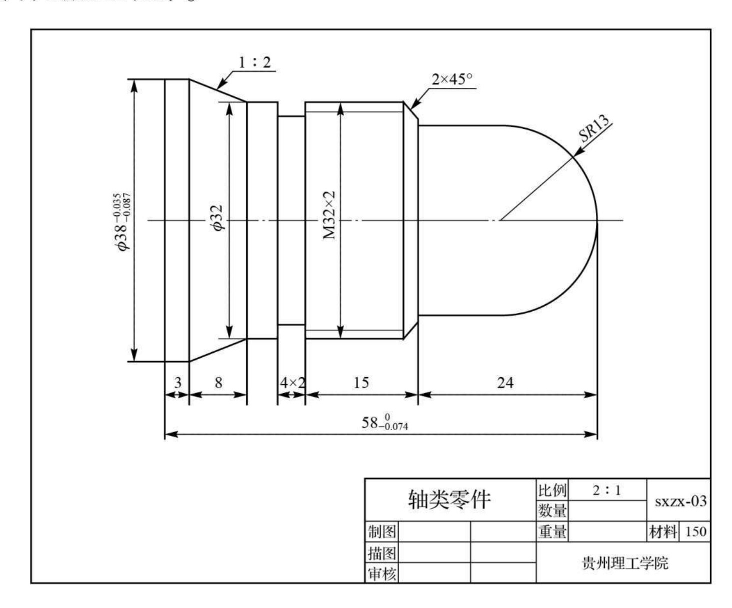
参考程序如下：

```
O0001;
T0101 M03  S600;
G00 X35 Z0;
G01 X0 F0.2;(平端面)
G00 X100  Z100;
T0202;
G00 X35 Z1;
G73 U5  R5;
G73 P1 Q2 U0.4 F0.3;
N1 G00 X20 S1000;
G01 Z-112.52 F0.08;
G03 X26 Z-24.66 R10;
G01 X18 Z-44.66;
G02 X28 Z-52.66 R8;
N2 G01 Z-70;
G70 P1 Q2;
G00 X100 Z100;
S600;
T0101;
G00 X16.22 Z0.44;
G01 X20.88 Z-1.94 F0.1;
G00 X28.88;
Z-58.56;
G01 X25.12 Z-60.88;
G00 X100;
Z100;
S400;
T0303;
G00 X21 Z-13.3;
G01 X16 F0.1;
G00 X100;
Z100;
T0404;
G00 X25 Z6;
G92 X19.5  Z-11.5 F1.5;
X19;
X18.5;
X18.2;
X18;
G00 X100 Z100;
```

```
T0303;
G00 Z-63.3;
X35;
G01 X0 F0.1;
G00 X100;
Z100;
M05;
M30;
```

思考题

1. 数控车床由哪几部分组成?
2. 数控车床加工的对象及特点有哪些?
3. 数控车床根据运动轨迹不同可以分类哪些类型?
4. 首件试切在数控车削中的作用是什么?
5. 简述数控车削与排头车削的区别。
6. 编写零件的加工程序。





第 13 章　加工中心（数控铣）

教学目的和要求：通过项目训练使学生熟悉加工中心的整个加工过程；对一般难度机械加工零件图纸能进行工艺分析，掌握工艺规程和数控程序的编写；较熟练操作数控铣床和加工中心，培养学生的综合运用知识和提高操作技能的能力；提高学生基本素质，具有良好的职业道德观。



13.1　数控铣床的加工概述

数控铣床（Numerical Control Milling Machine）适合于各种箱体类和板类零件的加工。它的机械结构除基础部件外，还包括主传动系统和进给传动系统，实现工件回转、定位的装置和附件，实现某些部件动作和辅助功能的系统和装置，如液压、气动、冷却等系统和排屑、防护等装置，特殊功能装置，如刀具破损监视、精度检测和监控装置，为完成自动化控制功能的各种反馈信号装置及元件。铣削加工是机械加工中最常用的加工方法之一，它主要包括平面铣削和轮廓铣削，也可以对零件进行钻、扩、铰、锪及螺纹加工等。

13.1.1　数控铣床的分类

1. 按主轴布置形式分类

按机床主轴的布置形式及布局特点分类，数控铣床可分为数控立式铣床、数控卧式铣床和数控龙门铣床等。

（1）立式数控铣床

一般可进行三坐标联动加工，目前三坐标数控立式铣床占大多数。如图 13－1 所示，数控立式铣床主轴与机床工作台面垂直，工件装夹方便，加工时便于观察，但不便于排屑。一般采用固定式立柱结构，工作台不升降。主轴箱做上下运动，并通过立柱内的重锤平衡主轴箱的质量。为保证机床的刚性，主轴中心线距立柱导轨面的距离不能太大，因此，这种结构主要用于中小尺寸的数控铣床。

此外，还有的机床主轴可以绕 X、Y、Z 坐标轴中其中一个或两个做数控回转运动的四坐标和五坐标数控立式铣床。通常，机床控制的坐标轴越多，尤其是要求联动的坐标轴越多，机床的功能、加工范围及可选择的加工对象也越多。但随之而来的就是机床结构更加复杂，对数控系统的要求更高，编程难度更大，设备的价格也更高。

数控立式铣床也可以附加数控转盘，采用自动交换台，增加靠模装置来扩大它的



图 13－1　立式数控铣床

功能、加工范围及加工对象，进一步提高生产效率。

（2）卧式数控铣床

卧式数控铣床与通用卧式铣床相同，其主轴轴线平行于水平面。如图 13－2 所示，数控卧式铣床的主轴与机床工作台面平行，加工时不便于观察，但排屑顺畅。为了扩大加工范围和扩充功能，一般配有数控回转工作台或万能数控转盘来实现四坐标、五坐标加工，这样不但工件侧面上的连续轮廓可以加工出来，而且可以实现在一次安装过程中，通过转盘改变工位，进行“四面加工”。尤其是万能数控转盘可以把工件上各种不同的角度或空间角度的加工面摆成水平来加工，这样可以省去很多专用夹具或专用角度的成形铣刀。虽然卧式数控铣床在增加了数控转盘后很容易做到对工件进行“四面加工”。使其加工范围更加广泛。但从制造成本上考虑，单纯的卧式数控铣床现在已比较少，而多是在配备自动换刀装置（ATC）后成为卧式加工中心。



图 13－2　卧式数控铣床



图 13－3　数控龙门铣床

（3）数控龙门铣床

对于大尺寸的数控铣床，一般采用对称的双立柱结构，以保证机床的整体刚性和强度，这就是数控龙门铣床。如图 13－3 所示，数控龙门铣床有工作台移动和龙门架移动两种形式。主要用于大、中等尺寸，大、中等质量的各种基础大件，板件、盘类件、壳体件和模具等多品种零件的加工，工件一次装夹后可自动高效、高精度的连续完成铣、钻、镗和铰等多种工序的加工，适用于航空、重机、机车、造船、机床、印刷、

轻纺和模具等制造行业。

2. 按数控系统的功能分类

按数控系统的功能分类，数控铣床可分为经济型数控铣床、全功能数控铣床和高速数控铣床等。

（1）经济型数控铣床

经济型数控铣床一般采用经济型数控系统，如 SE. MENS802S 等采用开环控制，可以实现三坐标联动。这种数控铣床成本较低，功能简单，加工精度不高，适用于一般复杂零件的加工，一般有工作台升降式和床身式两种类型。如图 13－4（a）所示。

（2）全功能数控铣床

全功能数控铣床采用半闭环控制或闭环控制，其数控系统功能丰富，一般可以实现四坐标以上的联动，加工适应性强，应用最广泛，如图 13－4（b）所示。



（a）经济型数控铣床



（b）全功能数控铣床

图 13－4　数控铣床

（3）高速数控铣床

高速铣削是数控加工的一个发展方向，技术已经比较成熟，已逐渐得到广泛的应用。这种数控铣床采用全新的机床结构、功能部件和功能强大的数控系统，并配以加工性能优越的刀具系统，加工时主轴转速一般在 8000～40000r/min，切削进给速度可达 10～30m/min，可以对大面积的曲面进行高效率、高质量的加工，如图 13－5 所示。但目前这种机床价格昂贵，使用成本比较高。



图 13－5　高速数控铣床

13.1.2 数控铣床的组成

数控铣床一般由数控系统、主传动系统、进给伺服系统、冷却润滑系统等几大部分组成：

（1）主传动系统　由主轴箱、主轴电机、主轴和主轴轴承等零件组成。主轴的启动、停止等动作和转速均由数控系统控制，并通过装在主轴上的刀具进行切削。

（2）进给伺服系统　由伺服电动机和进给执行机构组成，按照程序设定的进给速度实现刀具和工件之间的相对运动，包括直线进给运动和旋转运动。

（3）控制系统　数控铣床运动控制的中心，执行数控加工程序控制机床进行加工。

（4）辅助装置　如液压、气动、润滑、冷却系统和排屑、防护等装置。

（5）机床基础件　通常是指底座、立柱、横梁等，它是整个机床的基础和框架。

13.1.3 数控铣削加工的对象

数控铣削可以对工件进行铣削加工，也可以用来对工件进行钻、扩、铰、锪和镗孔加工与攻丝等。这里所说的主要加工对象及分类也是从铣削加工的角度来考虑的。

（1）平面类零件

加工面平行、垂直于水平面或其加工面与水平面的夹角为定角的零件称为平面类零件。根据定义，如图 13－6 所示的三个零件都属于平面类零件。目前，在数控铣床上加工的绝大多数零件属于平面类零件。平面类零件的特点是，各个加工单元面是平面，或可以展开成为平面。平面类零件是数控铣削加工对象中最简单的一类，一般只需用三坐标数控铣床的两坐标联动就可以把它们加工出来。

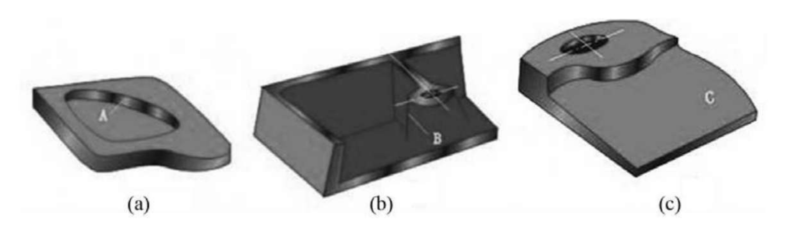


图 13－6　平面类零件

（2）变斜角类零件

加工面与水平面的夹角呈连续变化的零件称为变斜角类零件这类零件多数为飞机零件，如飞机上的整体梁、框、缘条与肋等，此外还有检验夹具与装配型架等。变斜角类零件的变斜角加工面不能展开为平面，但在加工中，加工面与铣刀圆周接触的瞬间为一条直线。最好采用 4 坐标和 5 坐标数控铣床摆角加工，在没有上述机床时，也可用 3 坐标数控铣床上进行 2.5 坐标近似加工，如图 13－7 所示。

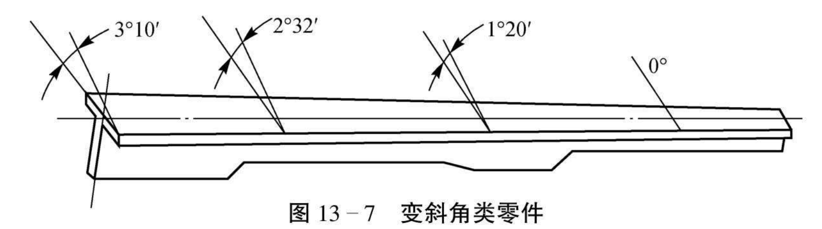


图 13－7　变斜角类零件

（3）曲面类（立体类）零件

加工面为空间曲面的零件称为曲面类零件。曲面类零件的特点其一是加工面不能展开为平面；其二是加工面与铣刀始终为点接触，如图 13－8 所示。

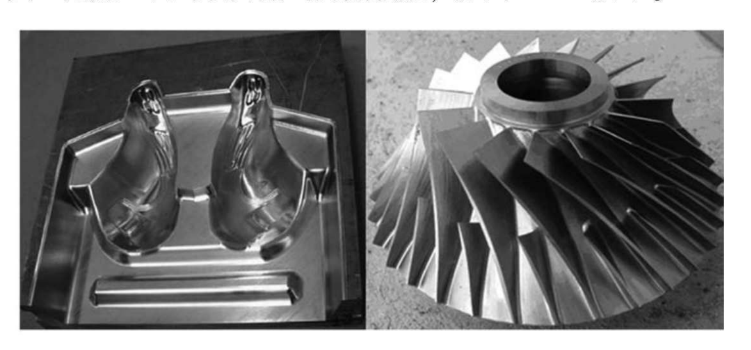


图 13－8　曲面类零件



13.2　加工中心概述

加工中心，简称 CNC，是由机械设备与数控系统组成的使用于加工复杂形状工件的高效率自动化机床（如图 13－9 所示）。它由数控铣床发展演变而来，它与数控铣床同样具有计算机数控系统（CNC）、伺服系统、机械本体、液压系统等组成结构。但加工中心又不等同于数控铣床，加工中心与数控铣床的最大区别在于加工中心备有刀库，具有自动换刀功能，是对工件一次装夹后进行多工序加工的数控机床。加工中心是高度机电一体化的产品，工件装夹后，数控系统能控制机床按不同工序自动选择、更换刀具、自动对刀、自动改变主轴转速、进给量等，可连续完成钻、镗、铣、铰、攻丝等多种工序，因而大大减少了工件装夹时间、测量和机床调整等辅助工序时间，对加工形状比较复杂，精度要求较高，品种更换频繁的零件具有良好的经济效果。



图 13－9　加工中心

13.2.1　加工中心分类

1. 按加工工序分类

加工中心按加工工序分类，可分为镗铣加工中心与车铣加工中心两大类。

2. 按控制轴数分类

加工中心按控制轴数可分为：三轴加工中心、四轴加工中心、五轴加工中心。

3. 按主轴与工作台相对位置分类

（1）卧式加工中心：是指主轴轴线与工作台平行设置的加工中心，主要适用于加工箱体类零件。卧式加工中心一般具有分度转台或数控转台，可加工工件的各个侧面；也可作多个坐标的联合运动，以便加工复杂的空间曲面。

（2）立式加工中心：是指主轴轴线与工作台垂直设置的加工中心，主要适用于加工板类、盘类、模具及小型壳体类复杂零件。立式加工中心一般不带转台，仅作顶面加工。

此外，还有带立、卧两个主轴的复合式加工中心，和主轴能调整成卧轴或立轴的立卧可调式加工中心，它们能对工件进行五个面的加工。

（3）万能加工中心（又称多轴联动型加工中心）：是指通过加工主轴轴线与工作台回转轴线的角度可控制联动变化，完成复杂空间曲面加工的加工中心。适用于具有复杂空间曲面的叶轮转子、模具、刃具等工件的加工。

多工序集中加工的形式扩展到了其他类型数控机床，例如车削中心，它是在数控车床上配置多个自动换刀装置，能控制三个以上的坐标，除车削外，主轴可以停转或分度，而由刀具旋转进行铣削、钻削、铰孔和攻丝等工序，适于加工复杂的旋转体零件。

13.2.2 加工中心的刀库

工件在加工中心上经一次装夹后，数控系统能控制机床按不同工序，自动选择和更换刀具，自动改变机床主轴转速、进给量和刀具相对工件的运动轨迹及其他辅助机能，依次完成工件几个面上多工序的加工。并且有多种换刀或选刀功能，从而使生产效率大大提高。加工中心的自动换刀装置由存放刀具的刀库和换刀机构组成。刀库种类很多，常见的有盘式和链式两类。链式刀库存放刀具的容量较大。

换刀机构在机床主轴与刀库之间交换刀具，常见的为机械手；也有不带机械手而由主轴直接与刀库交换刀具的，称无臂式换刀装置。

加工中心刀库分为圆盘式刀库及机械手刀库两种

1. 圆盘式刀库

圆盘式刀库应该称之为固定地址换刀刀库，即每个刀位上都有编号，一般从 1 编到 12、18、20、24 等，即为刀号地址。操作者把一把刀具安装进某一刀位后，不管该刀具更换多少次，总是在该刀位内。

2. 机械手刀库

机械手刀库换刀是随机地址换刀。每个刀套上无编号，它最大的优点是换刀迅速、可靠。



13.3　数控铣削加工工艺

13.3.1　零件工艺分析

1. 零件图样的工艺性分析

（1）分析零件图样的尺寸标注

由于加工程序是以准确的坐标点来编制的，因此，各图形几何要素间的相互关系应明确，各种几何要素的条件要充分，应无引起矛盾的多余尺寸或影响工序安排的封闭尺寸等。

（2）保证获得要求的加工精度

虽然数控机床精度很高，但对一些特殊情况，例如过薄的底板与肋板，因为加工时产生的切削拉力及薄板的弹性退让极易产生切削面的振动，使薄板厚度尺寸公差难以保证，当面积较大的薄板厚度小于 3mm 时就应充分重视这一问题。

（3）尽量统一零件轮廓内圆弧的有关尺寸

轮廓内圆弧半径 R 常常限制刀具的直径。如图 13－10 所示，如工件的被加工轮廓高度不高，转接圆弧半径也大，可以采用较大直径的铣刀来加工，加工其底板面时，走刀次数也相应减少，表面加工质量也会好一些，因此工艺性较好；反之，数控铣削工艺性较差。一般来说，当 $R<0.2H$ 时，零件该部位的工艺性较差。

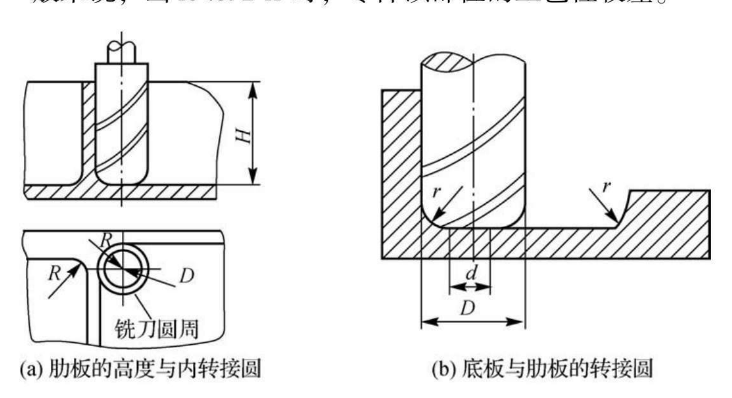


图 13－10　刀具与轮廓内圆弧关系

（4）保证基准统一的原则

有些工件需要在铣完一面后再重新安装铣削另一面，数控切削往往会因为工件的重新安装而产生刀痕。需要采用统一基准定位，因此零件上应有合适的孔作为定位基准孔。如果零件上没有基准孔，也可以专门设置工艺孔作为定位基准。

（5）分析零件的变形情况

数控铣削工件在加工时的变形，不仅影响加工质量，而且当变形较大时，将使加工不能继续进行下去。这时就应当考虑采取一些必要的工艺措施进行预防，如：对钢件进行调质处理，对铸铝件进行退火处理，对不能用热处理方法解决的，也可考虑粗、精加工及对称去余量等常规方法。

2. 零件毛坯的工艺性分析

进行零件铣削加工时，由于加工过程的自动化，使余量的大小、如何定位装夹等问题在设计毛坯时就要仔细考虑好；如果毛坯不适合数控铣削，加工将很难进行下去。下列几方面应作为毛坯工艺性分析的要点：

（1）分析毛坯的余量大小及均匀性

毛坯应有充分、稳定的加工余量，分析毛坯余量主要考虑在加工时是否要分层切削，分几层切削，也要分析加工中与加工后的变形程度，考虑是否应采取预防性措施与补救措施。

（2）分析毛坯在装夹定位方面的适应性

毛坯在加工时的装夹定位方面具有可靠性与方便性，以便使数控铣床在一次安装中加工出更多的待加工面。必要时考虑要不要另外增加装夹余量或工艺凸台来定位与夹紧。

13.3.2　夹具的种类与选用原则

1. 夹具选用原则

在生产量小或研制生产时，应广泛采用万能组合夹具，只用在组合夹具无法解决时才考虑采用其他夹具；小批量或成批生产时可考虑采用专用夹具，但应量简单；在生产批量较大时可考虑采用多工位夹具和气动、液压夹具。

2. 常用夹具的种类

（1）通用铣削夹具：螺钉压板、平口钳、分度头和三爪卡盘等。

螺钉压板　利用T形槽螺栓和压板将工件固定在机床工作台上即可。装夹工件时，需根据工件装夹精度要求，用百分表等找正工件。

机用平口钳（又称虎钳）　形状比较规则的零件铣削时常用平口钳装夹，方便灵活，适应性广。当加工一般精度要求和夹紧力要求的零件时常用机械式平口钳，平口钳靠丝杠/螺母相对运动来夹紧工件；当加工精度要求较高，需要较大的夹紧力时，可采用较高精度的液压式平口钳。

平口钳在数控铣床工作台上的安装要根据加工精度要求控制钳口与 X 或 Y 轴的平行度，零件夹紧时要注意控制工件变形。

铣床用卡盘　当需要在数控铣床上加工回转体零件时，可以采用三爪卡盘装夹，对于非回转零件可采用四爪卡盘装夹。

（2）专用铣削夹具

特别为某一项或类似的几项工件设计制造的夹具，一般用在产量较大或研制需要时采用。其结构固定，仅使用于一个具体零件的具体工序，这类夹具设计应力求简化，目的使制造时间尽量缩短。

（3）多工位夹具

可以同时装夹多个工件，可减少换刀次数，以便于一面加工，一面装卸工件，有利于缩短辅助加工时间，提高生产率，较适合中小批量生产。

（4）气动或液压夹具

适合生产批量较大，采用其他夹具又特别费工、费力的场合，能减轻工人劳动强度和提高生产率，但此类夹具结构较复杂，造价很高，而且制造周期较长等缺点。

（5）回转工作台

为了扩大数控机床的工艺范围，数控机床除了沿 X、Y、Z 三个坐标轴做直线进给外，往往还需要有绕 Y 或 Z 轴的圆周进给运动。数控机床的进给运动一般由回转工作台来实现，对于加工中心回转工作台已成为一个不可缺少的部件。

数控机床中常用的回转工作台有分度工作台和数控回转工作台。

1）分度工作台　分度工作台只能完成分度运动，不能实现圆周进给；分度时也可以采用手动分度。分度工作台一般只能回转规定的角度。

2）数控回转工作台　其主要作用是根据数控装置发出的指令脉冲信号，完成圆周进给运动，进行各种圆弧加工或曲面加工，它也可以进行分度工作。

数控回转工作台可以使数控铣床增加一个或两个回转坐标，通过数控系统实现四坐标或五坐标联动，可有效地扩大工艺范围，加工更为复杂的工件。

13.3.3　刀具的选择

1. 面加工、轮廓加工刀具

（1）面铣刀

面铣刀的圆周表面和端面上都有切削刃，端部切削刃为副切削刃，常用于端铣较大的平面。面铣刀多制成套式镶齿结构，如图 13－11 所示，刀齿为高速钢或硬质合金，一般刀体材料为 40Cr。

硬质合金面铣刀按刀片和刀齿的安装方式不同，可分为整体式、机夹一焊接式和可转位式三种。

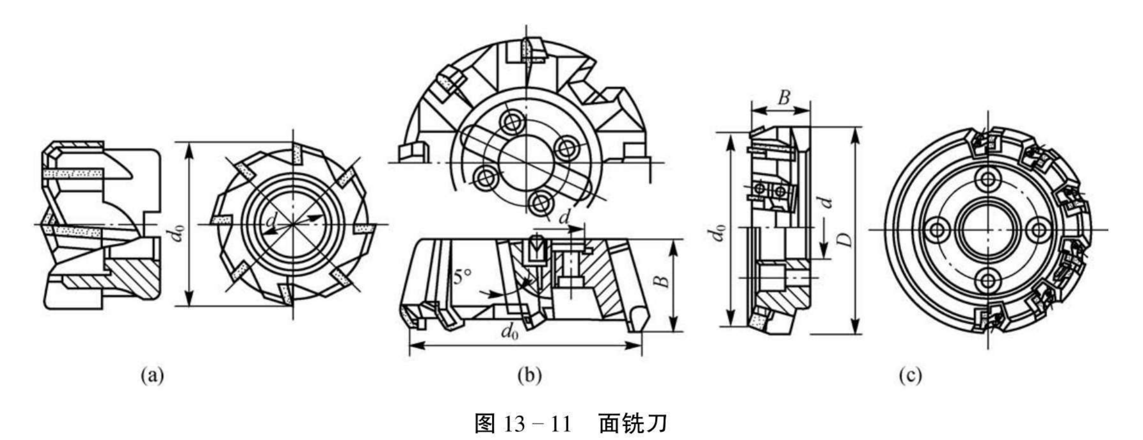


图 13－11　面铣刀

（2）立铣刀

立铣刀是数控铣削中最常用的一种铣刀，其结构如图 13－12 所示。立铣刀的圆柱表面和端面上都有切削刃，圆柱表面的切削刃为主切削刃，端面上的切削刀为副切削刃。主切削刃一般为螺旋齿，这样可以增加切削平稳性，提高加工精度。由于普通立铣刀端面中心处无切削刃，所以立铣刀不能作轴向进给，端面刃主要用来加工与侧面相垂直的底平面。

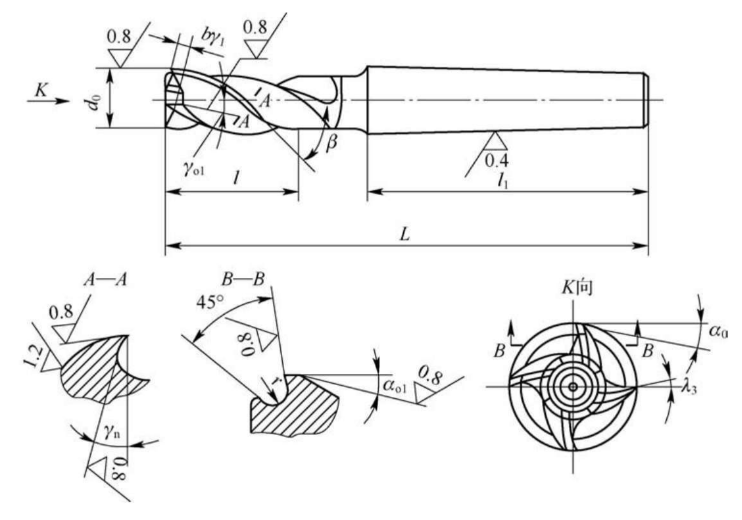


图 13 - 12　立铣刀

（3）模具铣刀

模具铣刀由立铣刀发展而成，适用于加工空间曲面零件，有时也用于平面类零件上有较大转接凹圆弧的过渡加工。模具铣刀可分为圆锥形立铣刀（圆锥半角 = 3°、5°、7°、10°）、圆柱形球头立铣刀和圆锥形球头立铣刀三种，其柄部有直柄、削平型直柄和莫氏锥柄。

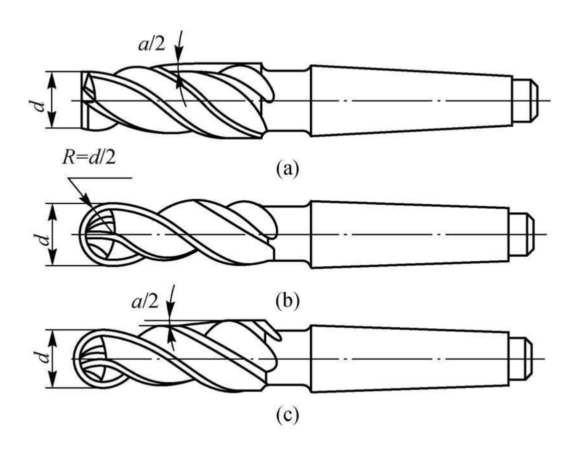


图 13 - 13　高速钢模具铣刀

（4）键槽铣刀

键槽铣刀有两个刀齿，圆柱面和端面都有切削刃，端面刃延至中心，既像立铣刀，又像钻头，如图 13 - 14 所示。加工时先轴向进给达到槽深，然后沿键槽方向铣出键槽全长。

（5）鼓形铣刀

主要用于对变斜角类零件的变斜角面的近似加工。它的切削刃分布在半径为 R 的圆弧面上，端面无切削刃，如图 13 - 15 所示，R 越小，加工的斜角范围越大，这种刀具刃磨困难，切削条件差，不适于加工有底的轮廓表面。

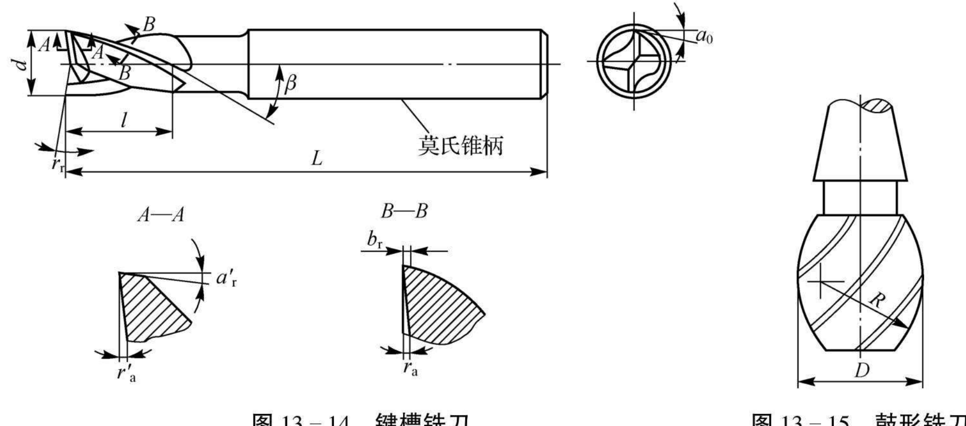


图 13－14　键槽铣刀　　　　图 13－15　鼓形铣刀

（6）成形铣刀

如图 13－16 所示是几种成型铣刀，成型铣刀为特定的加工内容专门设计制造的，如角度面、凹槽、特形孔等。

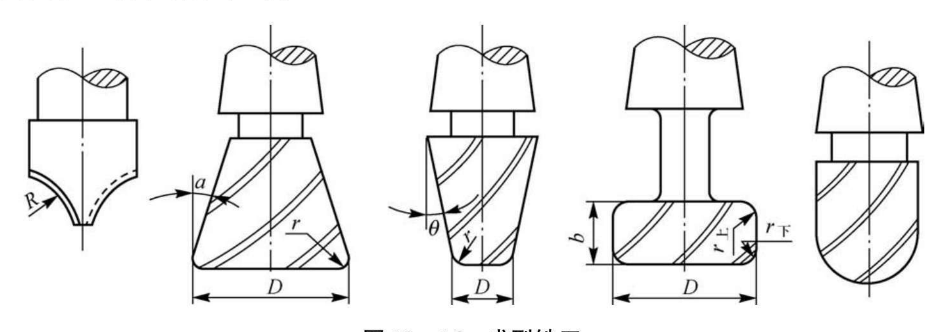


图 13－16　成型铣刀

2. 孔加工刀具

（1）麻花钻

在数控铣床、加工中心上钻孔，大多是采用普通麻花钻，麻花钻有高速钢和硬

（2）扩孔刀具

标准扩孔钻一般有 3~4 条主切削刃，切削部分的材料为高速钢或硬质合金，结构形式有直柄式、锥柄式和套式等。扩孔直径较小时，可选用直柄式扩孔钻，扩孔直径中等时，可选用锥柄式扩孔钻，扩孔直径较大时，可选用套式扩孔钻。扩孔钻的加工余量较小，容屑槽浅、刀体的强度和刚度较好。它无麻花钻的横刃，加之刀齿多，所以导向性好，切削平稳，加工质量和生产率都比麻花钻高。

（3）镗孔刀具

镗孔所用刀具为镗刀。镗刀种类很多，按切削刃数量可分为单刃镗刀和双刃镗刀。

单刃镗（如图 13－17 所示）刀刚性差，切削时易引起振动，所以镗刀的主偏角选得较大，以减小径向力。镗孔径的大小要靠调整刀具的悬伸长度来保证，调整麻烦，效率低，只能用于单件小批生产。但单刃镗刀结构简单，适应性较广，粗、精加工都适用。

在孔的精镗中，多选用精镗微调镗刀，如图 13－18 所示。这种横刀的径向尺寸可以在一定范围内进行微调，调节方便，且精度高，其结构如图所示。

镗削大直径的孔可选用图示的双刃镗刀，如图 13－18 所示。

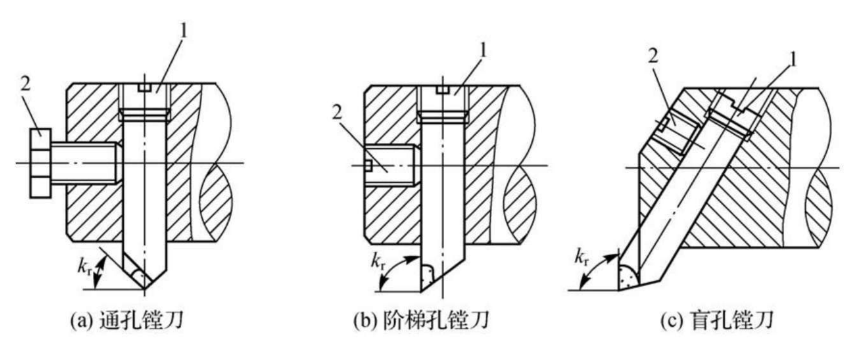


图 13－17　单刃镗刀

1—调节螺钉；2—紧固螺钉

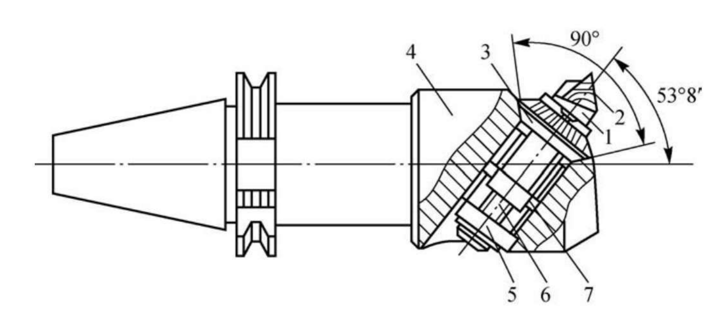


图 13－18　微调镗刀

1—刀体；2—刀片；3—调节螺母；4—刀杆；5—螺母；6—拉紧螺钉；7—导向键

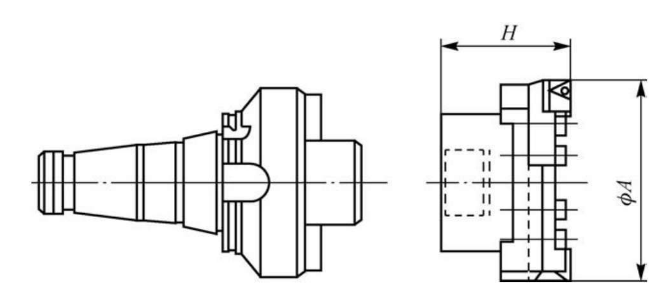


图 13－19　大直径双刃镗刀

（4）铰刀

加工中心上使用的铰刀多是通用标准铰刀。加工精度为 IT 7～IT10 级、表面粗糙度 Ra 为 0.8～1.6μm 的孔时。通用标准铰刀，有直柄、锥柄和套式三种。锥柄铰刀直径为 10～32mm，直柄铰刀直径为 6～20mm，小孔直柄铰刀直径为 1～6mm，套式铰刀直径为 25～80mm。铰刀工作部分包括切削部分与校准部分。切削部分为锥形，担负主要切削工作。切削部分的主偏角为 5°～15°，前角一般为 0°，后角一般为 5°～8°。

13.3.4　走刀路线的确定

1. 顺铣和逆铣的选择

铣削有顺铣和逆铣两种方式，如图 13－20 所示。当工件表面无硬皮，机床进给机

构无间隙时，应选用顺铣，按照顺铣安排进给路线。因为采用顺铣加工后，零件已加工表面质量好，刀齿磨损小。精铣时，应尽量采用顺铣。

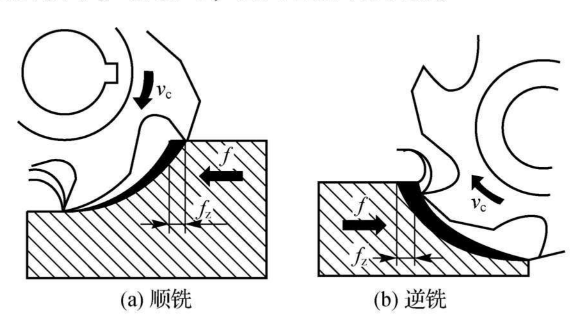


图 13－20　顺铣与逆铣

当工件表面有硬皮，机床的进给机构有间隙时，应选用逆铣，因为逆铣时，刀齿是从已加工表面切入，不会崩刀；机床进给机构的间隙不会引起振动和爬行。

2. 铣削外轮廓的进给路线

（1）平面零件外轮廓铣削路线

一般采用立铣刀侧刃切削。刀具切入工件时应沿切削起始点的延伸线逐渐切入工件，保证零件曲线的平滑过渡。在切离工件时，也要沿着切削终点延伸线逐渐切离工件，如图 13－21 所示。

（2）铣削外整圆的铣削路线

如图 13－22 所示，要安排刀具从切向进入圆周铣削加工，当整圆加工完毕后，不要在切点处直接退刀，而应让刀具沿切线方向多运动一段距离，以免取消刀补时，刀具与工件表面相碰，造成工件报废。

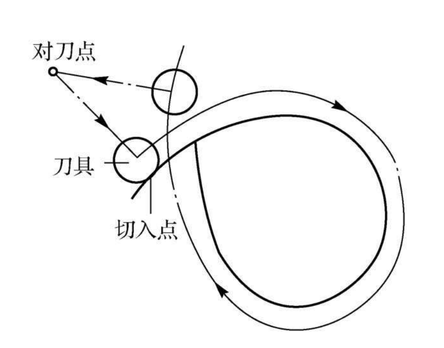


图 13－21　外轮廓加工刀具的切入和切出

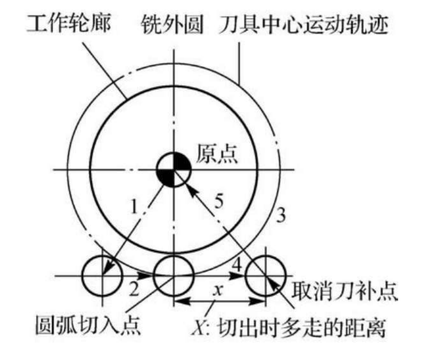


图 13－22　外圆铣削

（3）铣削内轮廓的进给路线

（1）封闭的内轮廓表面铣削路线

若内轮廓曲线不允许外延，如图 13－23（a）所示，刀具只能沿内轮廓曲线的法向切入、切出，此时刀具的切入、切出点应尽量选在内轮廓曲线两几何元素的交点处。当内部几何元素相切无交点时，如图 13－23（b）所示，为防止刀补取消时在轮廓拐角处留下凹口，刀具切入、切出点应远离拐角。

（2）当用圆弧插补铣削内圆弧时也要遵循从切向切入、切出的原则，最好安排从圆弧过渡到圆弧的加工路线（如图 13－24 所示）提高内孔表面的加工精度和质量。

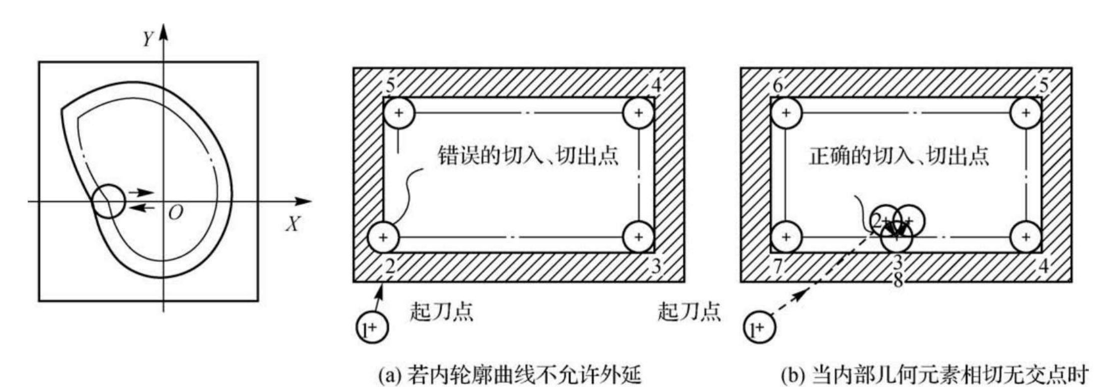


图 13－23　内轮廓加工刀具的切入和切出

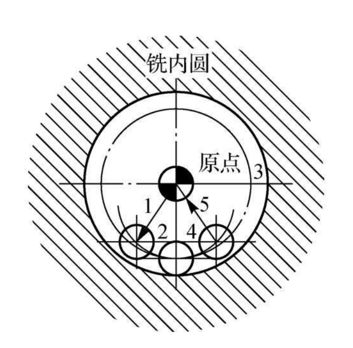


图 13－24　内圆铣削

（4）铣削内槽的进给路线

内槽是指以封闭曲线为边界的平底凹槽。一般用平底立铣刀加工，刀具圆角半径应符合内槽的图纸要求。如图 13－25 所示为加工内槽的三种进给路线。采用综合行、环切法进给路线，即先用行切法切去中间部分余量，最后用环切法环切一刀光整轮廓表面，既能使总的进给路线较短，又能获得较好的表面粗糙度。

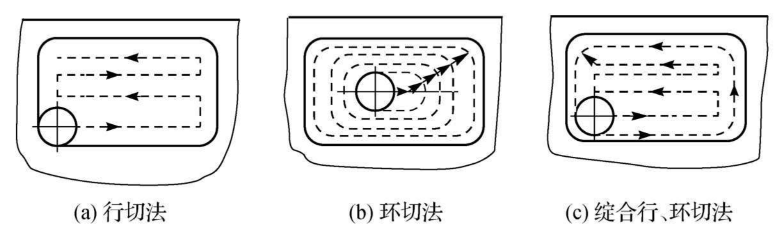


图 13－25　凹槽加工进给路线

（5）铣削曲面轮廓的进给路线

铣削曲面时，常用球头刀采用“行切法”进行加工。所谓行切法是指刀具与零件轮廓的切点轨迹是一行一行的，而行间的距离是按零件加工精度的要求确定的。

对于边界敞开的曲面加工，可采用两种加工路线，如图 13－26 所示发动机大叶片，当采用图 13－26（a）所示的加工方案时，每次沿直线加工，刀位点计算简单，程序少，加工过程符合直纹面的形成，可以准确保证母线的直线度。当采用图 13－26（b）所示的加工方案时，符合这类零件数据给出情况，便于加工后检验，叶形的准确度较

高，但程序较多。由于曲面零件的边界是敞开的，没有其他表面限制，所以曲面边界可以延伸，球头刀应由边界外开始加工。

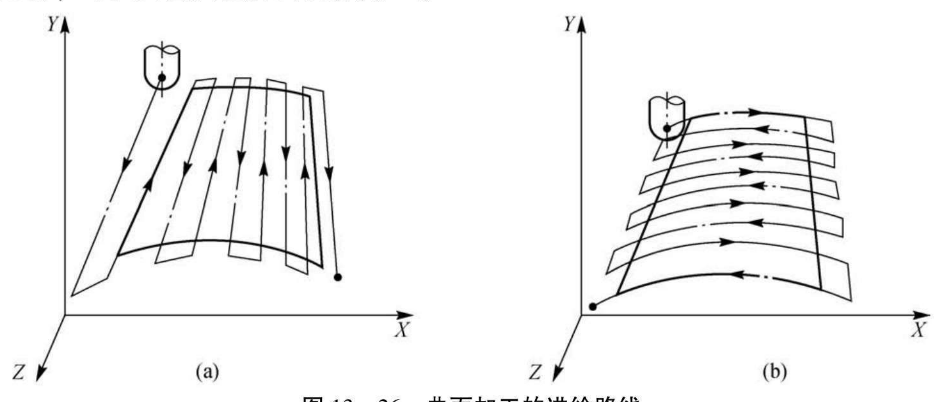


图 13－26　曲面加工的进给路线

（6）孔加工走刀路线

对于位置度要求较高的孔加工，精加工时一定要注意各孔的定位方向要一致，即采用单向趋近定位点的方法，以避免传动系统反向间隙误差或测量系统的误差对定位精度的影响。如图 13－27（a）所示的孔系加工路线，在加工孔 D 时，X 轴的反向间隙将会影响 C、D 两孔的孔距精度。如图 13－27（b）所示的孔系加工路线，可使各孔的定位方向一致，提高孔距精度。

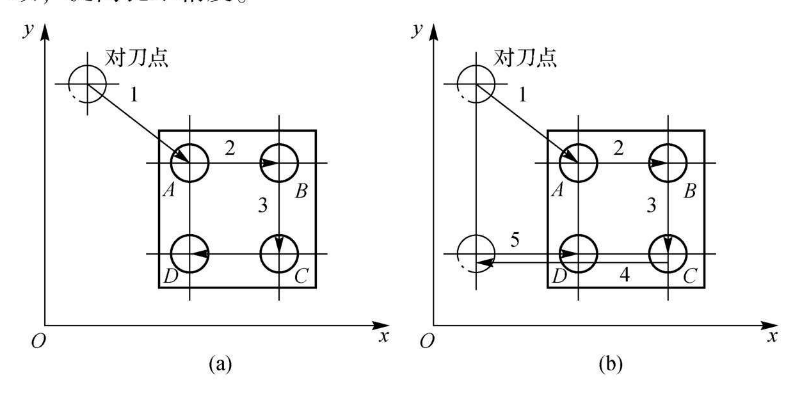


图 13－27　孔加工走刀路线

13.3.5　切削用量的选择

1. 面、轮廓加工切削用量的选择

如图 13－28 所示，数控铣床的切削用量包括切削速度、进给速度、背吃刀量和侧吃刀量。从刀具耐用度出发，切削用量的选择方法是：先选取背吃刀量或侧吃刀量，其次确定进给速度，最后确定切削速度。

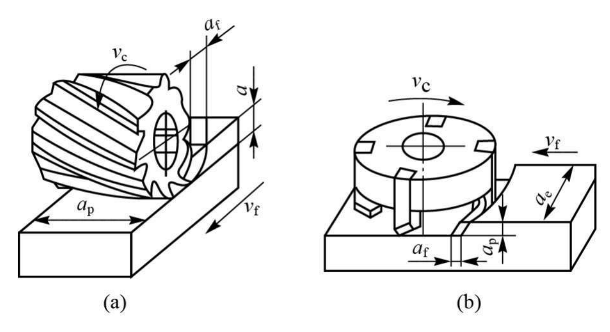


图 13－28　铣削切削用量

(1) 端铣背吃刀量（或周铣侧吃刀量）选择

背吃刀量或侧吃刀量的选取，主要由加工余量和对表面质量的要求决定。

1) 工件表面粗糙度 Ra 值为 12.5～25μm 时，如果圆周铣削的加工余量小于 5mm，端铣的加工余量小于 6mm，粗铣时一次进给就可以达到要求。但在余量较大，工艺系统刚性较差或机床动力不足时，可分两次进给完成。

2) 在工件表面粗糙度 Ra 值为 3.2～12.5μm 时，可分粗铣和半精铣两步进行。粗铣时背吃刀量或侧吃刀量选取同①。粗铣后留 0.5～1mm 余量，在半精铣时切除。

3) 在工件表面粗糙度 Ra 值为 0.8～3.2μm 时，可分粗铣、半精铣、精铣三步进行。半精铣时背吃刀量或侧吃刀量取 1.5～2mm；精铣时，圆周铣侧吃刀量取 0.3～0.5mm，端铣背吃刀量取 0.5～1mm。

(2) 进给速度

进给速度（ν_f）是单位时间内工件与铣刀沿进给方向的相对位移，它与铣刀转速（n）、铣刀齿数（z）及每齿进给量（f_z）的关系为：$\nu_f = f_z zn$，每齿进给量 f_z 的选取主要取决于工件材料的力学性能、刀具材料、工件表面粗糙度等因素。工件材料的强度和硬度越高，每齿进给量越小，反之则越大。硬质合金铣刀的每齿进给量高于同类高速钢铣刀。工件表面粗糙度 Ra 值越小，每齿进给量就越小，工件刚性差或刀具强度低时，应取小值。

(3) 切削速度

铣削的切削速度与刀具耐用度 T、每齿进给量 f_z、背吃刀量 a_p、侧吃刀量 a_e、铣刀齿数 Z 成反比，而与铣刀直径成正比。其原因是当 f_z、a_p、a_e、和 Z 增大时，刀刃负荷增加工作齿数也增多，使切削热增加，刀具磨损加快，从而限制了切削速度的提高。同时，刀具耐用度的提高使允许使用的切削速度降低。但加大铣刀直径 d 则可改善散热条件，因而提高切削速度。铣削的切削速度可参考相关的切削手册。

2. 孔加工切削用量的选择

孔加工为定尺寸加工，切削用量的选择应在机床允许的范围之内选择，查阅手册并结合经验确定。

(1) 孔加工时的主轴转速 n（r/min），根据选定的切削速度 ν_c（m/min）和加工直径或刀具直径计算。

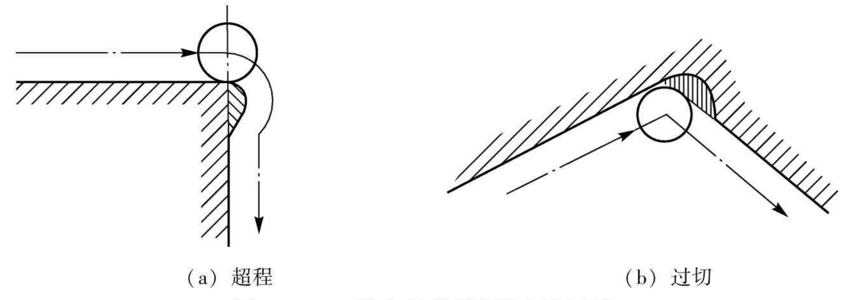
(2) 孔加工工作进给速度 f，根据选择的进给量和主轴转速计算进给速度。

$$f = v_c \times n$$

(3) 攻螺纹时进给量的选择决定于螺纹的导程，由于使用了带有浮动功能的攻螺

纹夹头，攻螺纹时工作进给速度 v_f（mm/min）可略小于理论计算值，即：$v_f \leqslant P_n$（P 为导程）

在确定工作进给速度时，要注意一些特殊情况。例如，在高速进给的轮廓加工中，由于工艺系统的惯性在拐角处易产生“超程”和“过切”现象，如图 13－29 所示。因此，在拐角处应选择变化的进给速度，接近拐角时减速，过了拐角后加速。



（a）超程　　（b）过切

图 13－29　拐角处的超程和过切现象

13.3.6　填写工艺卡片

数控铣削加工工艺卡片一般包括数控加工刀具卡、数控加工工艺卡、机床调整卡和程序单等，工艺卡片的填写根据零件的复杂程度不同，填写的内容有所差异。如表 13－1、表 13－2 所示。

表 13－1　数控加工刀具卡片

产品名称或代号		×××	零件名称		零件图号		×××
序号	刀具号	刀具规格名称/mm	数量	加工表面（尺寸单位 mm）			备注
1	T01	×××	×				
2	T02	×××	×				
…	…	…	…	…			
编制	×××	审核	×××	批准	×××	共页	第页

表 13－2　铣床变速箱体数控加工工艺卡片

单位名称	×××	产品名称或代号		零件名称		零件图号		
		×××		×××		×××		
工序号	程序编号	夹具名称		使用设备		车间		
×××	×××	组合夹具						
工步号	工步内容（尺寸单位 mm）	刀具号	刀具规格/mm	主轴转速/r. min^{-1}	进给速度/mm. min^{-1}	背吃刀量/mm	备注	
1	×××							
2	×××							
…	…	…	…	…	…			
编制	×××	审核	×××	批准	×××	年　月　日	共　页	第　页



13.4　数控铣削编程基础

13.4.1　数控铣床坐标系

数控铣床坐标系遵循原机械工业部 1982 年颁布的 JB3052—1982 标准中制订的原则，数控铣床各坐标轴方向如图 13－30 所示。

1. 机床坐标系原点

在数控铣床上，机床原点一般由机床导轨上一固定点作参考点来确定，如图 13－31（a）所示。图中 O_1 即为立式数控铣床的机床原点，O_1 点位于 X、Y、Z 三轴正向移动的极限位置。

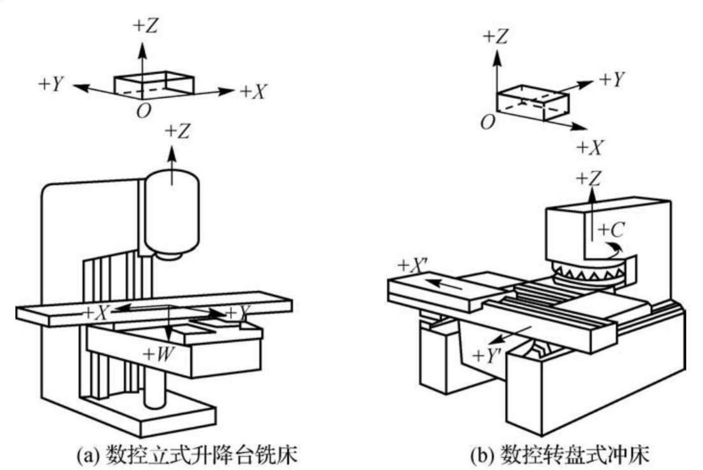


图 13－30　数控铣床坐标系

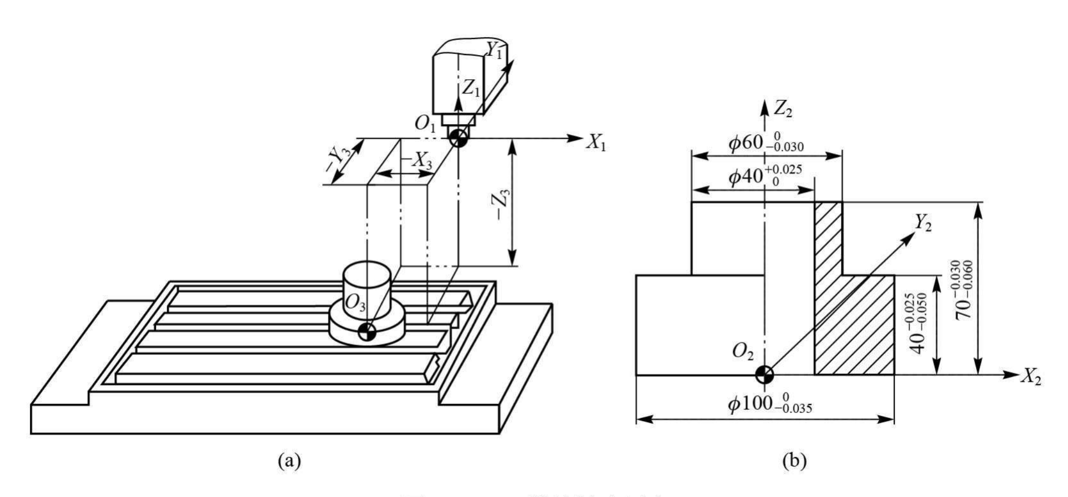


图 13－31　数控铣床原点

2. 工件坐标系原点

在零件上选定一特定点为原点建立坐标系，该坐标系为工件坐标系。坐标原点是确定工件轮廓的编程和接点计算的原点，叫工件原点，也叫编程原点。工件坐标系也叫编程坐标系。如图 13－31（b）中所示的 O_2 点。编程原点应尽量选择在零件的设计基准或工艺基准上，并考虑到编程的方便性，编程坐标系中各轴的方向应该与所使用数控机床相应的坐标轴方向一致。

3. 加工原点

加工原点也称程序原点。是指零件被装夹好后，相应的编程原点在机床原点坐标系中的位置。在加工过程中，数控机床是按照工件装卡好后的加工原点及程序要求进行自动加工的。加工原点如图 13－31（a）中的 O_3 所示。加工坐标系原点在机床坐标系下的坐标值 X_3、Y_3、Z_3，即为系统需要设定的加工原点设置值。

13. 4. 2　数控铣削编程指令

常用 G 代码如表 13－3 所示（以 FANUC-0i-Mate-MC 数控系统为例）。

G 代码分为两类，一类 G 代码仅在被指定的程序段中有效，称为一般 G 代码，例如 G04 等；另一类称为模态代码，一经指定，一直有效，直到被新的同组模态 G 代码取代，如 G00、G01 等。

同一组的 G 代码，在一个程序段中，只能有一个被指定，如果同组的几个 G 代码同时出现在一个程序段中，那么最后输入的那个 G 代码有效。

在固定循环中，如遇有 01 组的 G 代码时，固定循环将被自动撤销，相反 01 组的 G 代码却不受固定循环影响。

1. G92—设定加工坐标系

该指令的作用是通过该指令设定起刀点即程序开始运动的起点，从而建立加工坐标系。应该注意的是，该指令只是设定坐标系，机床（刀具或工作台）并未产生任何运动。这一指令通常出现在程序的第一段。

编程格式：G92 X_　Y_　Z_

式中，X、Y、Z 尺寸字是指定起刀点相对于加工原点的位置。

G92 指令执行后，系统按指令给定的 X、Y、Z 值作为当前刀具位置的坐标值，从而建立坐标系，后序所有坐标字指定的坐标都是该加工坐标系中的位置。

2. G53——选择机床坐标系

编程格式：G53 G90 X_　Y_　Z_

式中，X、Y、Z 为机床坐标系中的坐标值。

例如：加工程序中出现下述程序段

G53 G90 X-100 Y-100 Z-20

则执行后刀具在机床坐标系中的位置如图 13－32 所示。

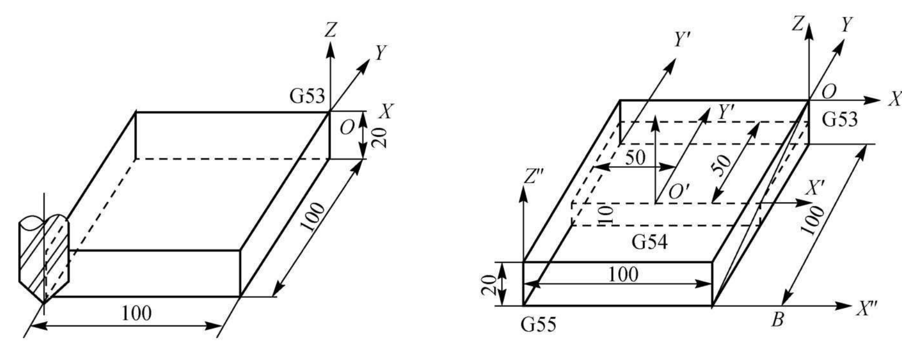


图 13－32　G53 机床坐标系图

3. 选择工件加工坐标系－G54－G59

选择工件加工坐标系指令可以分别用来选择相应的工件加工坐标系，如图 13－33 所示。

编程格式：G54　G90 G00/G01　X_　Y_　Z_　（F）

指令执行后，所有坐标字指定的尺寸坐标都为选定的工件加工坐标系中的位置。这 6 个工件加工坐标系是在对刀后通过操作面板设定的。

G92 指令与 G54～G59 指令都是用于设定工件加工坐标系的，但它们在使用中是有区别的；G92 指令是通过程序（起刀点的位置）来设定工件加工坐标系的；G92 所设定的加工坐标原点是与当前刀具所在位置有关的，这一加工原点在机床坐标系中的位置是随当前刀具位置的不同而改变的。G54～G59 指令是通过执行程序前在系统中设定的工件加工坐标系。一经设定，加工坐标原点在机床坐标系中的位置是不变的，它与刀具的当前位置无关。

另外，在采用 G54 方式时，通过 G92 指令编程后，也可建立一个新的工件加工坐标系，如图 13－33 所示。在 G54 方式时，当刀具定位于 XOY 坐标平面中的（200，160）点时，执行程序段：

G92 X100 Y100

就由向量 A 偏移产生了一个新的工件坐标系 $X'O'Y'$ 坐标平面。

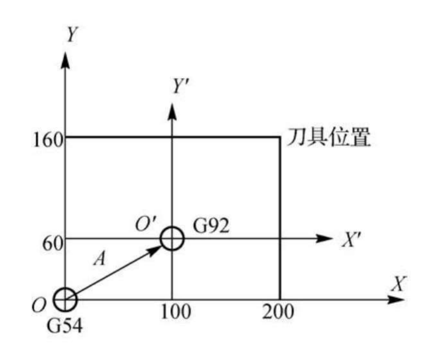


图 13－33　重新设定 X′O′Y′坐标平面

4. G02、G03—圆弧插补指令

编程格式：程序段有两种书写方式，一种是圆心法及用 I、J、K 编程（见图 13－34（a）所示，另一种是半径法及用 R 编程，如图 13－34（b）所示。



在 XY 平面内 $G17\begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix}X_\quad Y_\begin{Bmatrix}I_\quad J_\\R_\end{Bmatrix}F_$ ；

在 ZX 平面内 $G18\begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix}X_\quad Z_\begin{Bmatrix}I_\quad K_\\R_\end{Bmatrix}F_$ ；

在 YZ 平面内 $G19\begin{Bmatrix}G02\\G03\end{Bmatrix}Y_\quad Z_\begin{Bmatrix}J_\quad K_\\R_\end{Bmatrix}F_$ ；

1）判别方法：沿着不在圆弧平面内的坐标轴，由正方向向负方向看，顺时针方向走向为 G02，逆时针方向走向为 G03

2）I、J、K 从起点向圆弧中心方向的矢量分量，其算法为：圆心坐标值-圆弧起点坐标值

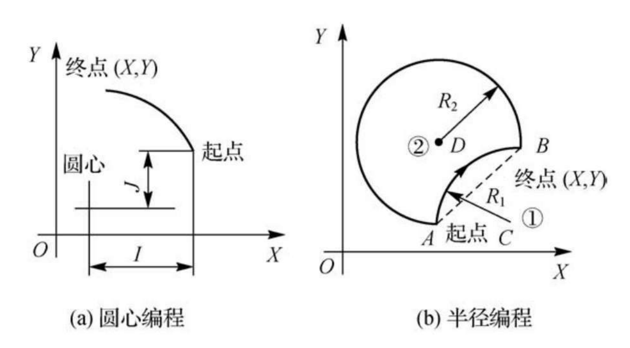


图 13－34　圆心编程与半径编程

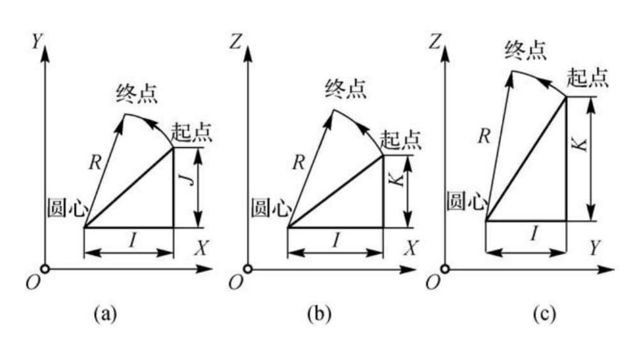


图 13－35　圆弧的坐标

即：$\begin{cases}I = X_{圆心} - X_{圆弧}\\J = Y_{圆心} - Y_{圆弧}\\K = Z_{圆心} - Z_{圆弧}\end{cases}$　3）用 R 指定圆弧插补时，当圆弧所夹的圆心角 α 为：$0° < \alpha \leqslant 180°$ 时 R 值为正；当圆弧所夹的圆心角 α 为：$360° > \alpha > 180°$ 时 R 值为负。当圆心角 $\alpha = 360°$ 时，即为一整圆时，只能采用 I、J、K 方式编程。

例 13. 1：如图 13－36 所示，圆弧程序的编写如下。

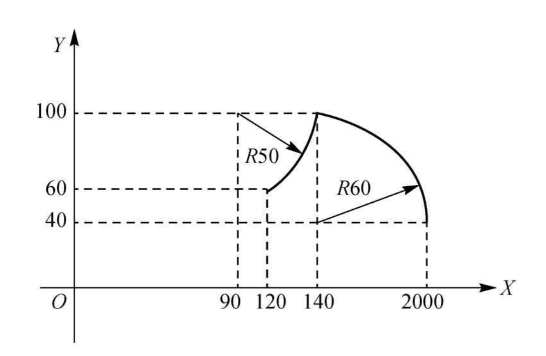


图 13－36　圆弧轮廓程序编写

圆心法：

G90 G54 G00 X200.0Y40.0；建立工件坐标系并确定起刀点

Z5.0；

G01 Z-1.0 F100；

G03 X140.0 Y100.0 I-60.0 F300；

G02 X120.0 Y60.0I-50.0；

半径法：

G90 G54 G00 X200.0Y40.0；

Z5.0；

G01 Z-1.0 F100；

G90G03 X140.0 Y100.0 R60.0 F300；

G02 X120.0 Y60.0R50.0；

例 13.2：如图 13－37 所示，起点在（20，0），整圆程序的编写如下：

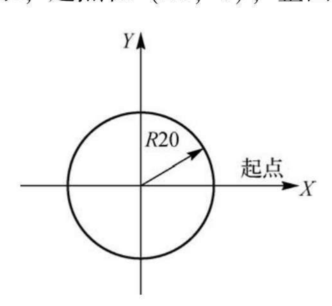


图 13－37　整圆程序的编写

绝对值编程

G90 G02 X20.0 Y0 I-20.0 F300；

5. 刀具补偿指令

（1）刀具半径补偿的意义

数控机床在实际加工过程中是通过控制刀具中心轨迹来实现切削加工任务的。在编程过程中，为了避免复杂的数值计算，一般按零件的实际轮廓来编写数控程序，但刀具具有一定的半径尺寸，如果不考虑刀具半径尺寸，那么加工出来的实际轮廓就会与图纸所要求的轮廓相差一个刀具半径值。因此，采用刀具半径补偿功能来解决这一问题。

（2）二维刀具半径补偿指令—G41、G42、G40

二维刀具半径补偿仅在指定的二维进给平面内进行，进给平面由 G17、G18 和 G19 指定，刀具半径或刀刃半径值则通过调用相应的刀具半径偏置存储器号码（用 H 或 D 指定）来取得。

G41
G42　编程格式：

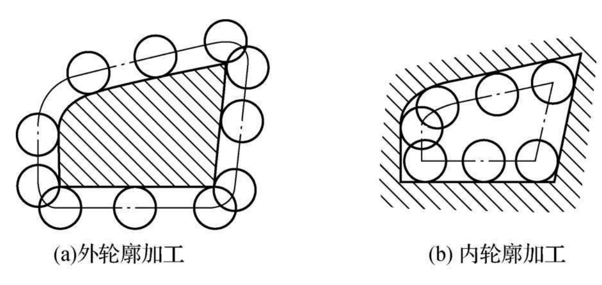
G01/G00　X_　Y_　D xx；

…

G01/G00 G40 X_　Y_

式中，G41-刀具半径左补偿；G42-刀具半径右补偿；G40-取消刀具半径补偿；*X*、*Y*——建立或取消刀具半径补偿的终点坐标值；Dxx——刀具偏置代号地址字，后面一般为两位数字的代号。

刀具半径补偿的目的在数控铣床上进行轮廓的铣削加工时，由于刀具半径的存在，刀具中心轨迹和工件轮廓不重合。当数控系统具备刀具半径补偿功能时，只需按工件轮廓进行编程，如图 13－38 中的粗实线轨迹，数控系统会自动计算刀心轨迹，使刀具



(a)外轮廓加工　　(b) 内轮廓加工

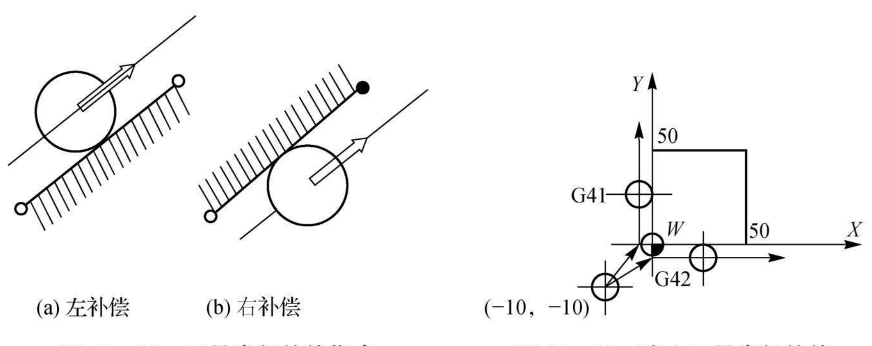
图 13－38　刀具半径补偿

偏离工件轮廓一个半径值，即进行刀具半径补偿。　（3）判断刀具半径左、右补偿的方法

假设工件不动，沿着刀具的运动方向向前看，刀具位于工件左侧的刀具半径补偿，称为刀具半径左补偿；假设工件不动，沿着刀具的运动方向向前看，刀具位于零件右侧的刀具半径补偿，称为刀具半径右补偿。如图 13－39 所示。

（4）刀具半径补偿的过程

刀具补偿过程的运动轨迹分为三个组成部分：形成刀具补偿的建立补偿程序段、零件轮廓切削程序段和补偿撤销程序段。



(a) 左补偿　　(b) 右补偿

图 13－39　刀具半径补偿指令

图 13－40　建立刀具半径补偿

例 13.3：在图 13－40 中，建立刀具半径左补偿的有关指令如下：

N10 G17 G90 G54 G00 X-10.0Y-10.0 Z0；定义编程原点，起刀点

N20 S900 M03；　　　主轴正转

N30 G01 G41 X0 Y0 D01；建立刀具半径左补偿，偏置存储器号为 D01

N40 Y50.0；　　　定义首段零件轮廓

其中，D01 为调用 D01 号刀具半径偏置存储器中存放的刀具半径值。

建立刀具半径右补偿的有关指令如下：

N30 G17 G42 X0 Y0 D01；建立刀具半径右补偿

N40 X50.0；　　　定义首段零件轮廓

(3)、刀具长度补偿指令-G43、G44、G49

为了简化零件的数控加工编程，现代 CNC 系统都具有刀具长度补偿功能。刀具长度补偿使刀具垂直于走刀平面（比如 *XY* 平面，由 G17 指定）偏移一个刀具长度修正值，因此编程过程中无须考虑刀具长度。

刀具长度补偿在发生作用前，必须先进行刀具参数的设置。设置的方法有机内试切法、机内对刀法、机外对刀法和编程法。有的数控系统补偿的是刀具的实际长度与标准刀具的差，如图 13－41（a）所示。有的数控系统补偿的是刀具相对于相关点的长度，如图 13－41（b）（c）所示，其中图（c）是圆弧刀的情况。

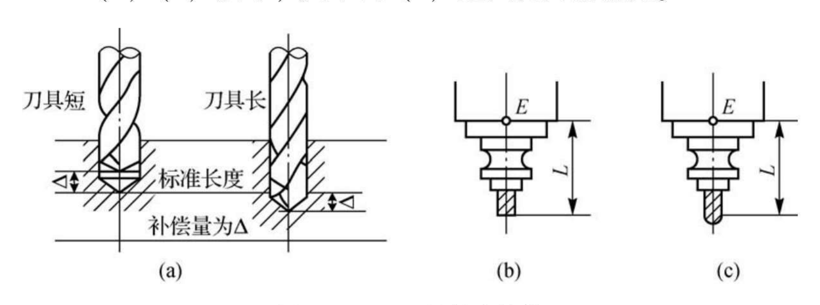


图 13－41　刀具长度补偿

编程格式：

$$\text{G01/G00}\left.\begin{matrix}\text{G43}\\\text{G44}\end{matrix}\right\} Z_\ \ H \qquad \text{或}\left.\begin{matrix}\text{G43}\\\text{G44}\end{matrix}\right\} H$$

…

G01/G00G49

式中　G43—刀具长度正补偿，即将 H 中的值加到 Z 坐标的尺寸字后，按其结果进行 Z 轴的移动；

G44—刀具长度负补偿，即从 Z 坐标的尺寸字中减去 H 中的值后，按其结果进行 Z 轴的移动；

G49—撤销刀具长度补偿；

H 代码指定偏置号，偏置号可为 H00～H200，偏置量与偏置号相对应，通过操作面板预先输入在存储器中；与偏置号 00 即 H00 相对应的偏置量，始终意味着零，不能设定与 H00 相对应的偏置量。

例 13.5：以钻孔为例，使用 G43/G44 指令时刀具实际位置与编程位置的情况如图 13－42 所示。

N10 G54 G00 X0 Y0 Z30
N20 G90G01 Z15 F100
N25 G01 X30
N30 G43 G01 Z15 H01
N35 G01X60
N40 G43 G01 Z15 H02
N50 G49G01 Z30
N60 M30

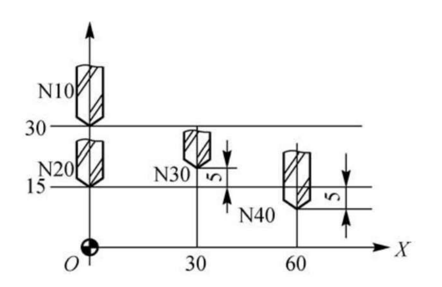


图 13－42　刀具长度补偿

设置 H01＝5，H02＝－5。

6. 常用孔加工的固定循环

固定循环的编程格式如下：

G90/G91 G98/G99 G73～G89 X_　Y_　Z_　R_　Q_　P_　F_　K_

式中：G90/G91-数据方式。G90 为绝对方式，G91 为增量方式。

G98/G99-返回点位置。G98 指令返回起始点，G99 指令返回 R 平面。

G73～G89-孔加工方式。G73～G89 是模态指令，因此，多孔加工时该指令只需指定一次，以后的程序段只给孔的位置即可。

X、*Y*—指定孔在 *XOY* 平面的坐标位置（增量或绝对坐标值）。

Z—指定孔底坐标值。在增量方式时平面到孔底的距离；在绝对值方式时，是孔底的 *Z* 坐标值。

R—在增量方式时，为起始点到 *R* 平面的距离；在绝对方式时，为 *R* 平面的绝对坐标值。

Q—在 G73、G83 中用来指定每次进给的深度；在 G76、G87 中指定刀具的退刀量。它始终是一个增量值。

P—孔底暂停时间。最小单位为 1ms。

F—切削进给的速度。

K—规定重复加工次数（1～6）。如果不指定 *K*，则只进行一次循环。*K*＝0 时，孔加工数据存入，机床不动作。在增量方式（G91）时，如果有孔距相同的若干相同孔，采用重复次数来编程是很方便的，在编程时要采用 G91、G99 方式。

（1）G73-高速钻孔循环

如图 13－43 所示。其中 d 由系统参数设定。

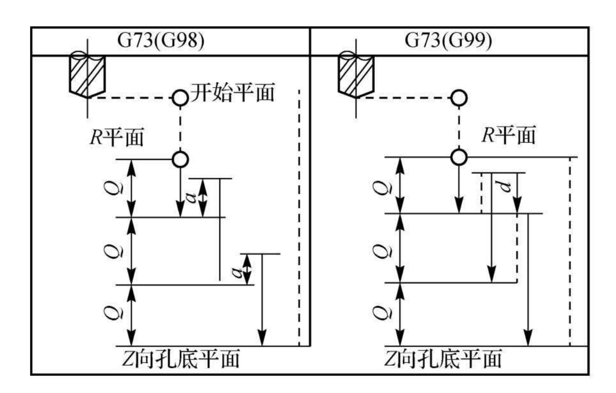


图 13－43　高速钻孔循环

（2）G74-攻螺纹（左螺纹）循环

该指令规定主轴移至 R 平面时启动，反转切入零件到孔底后主轴改为正转退出，

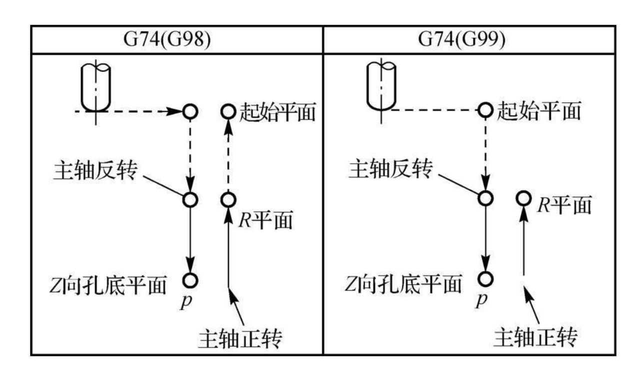


图 13－44　攻螺纹循环

在 G74 攻螺纹期间速度修调无效。如图 13－44 所示。　　（3）G76-精镗循环

该指令使主轴在孔底准停，主轴沿切入方向的反方向退出执行精镗。其中准停偏移量 Q 一般总为正值，偏移方向可以是+X，-X、+Y 或-Y，由系统参数选定。如图 13－45 所示。

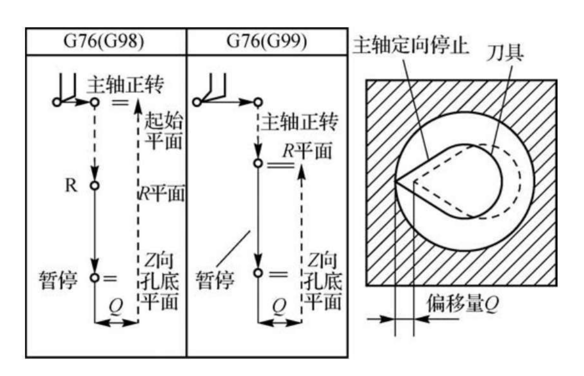


图 13－45　精镗循环

（4）G80-撤销固定循环

使用 G80 指令后，固定循环被取消，孔加工数据全部清除，从 G80 的下一程序段开始执行一般 G 指令。

（5）G81-定点钻孔循环

这是一种常用的钻孔加工方式。如图 13－46 所示。

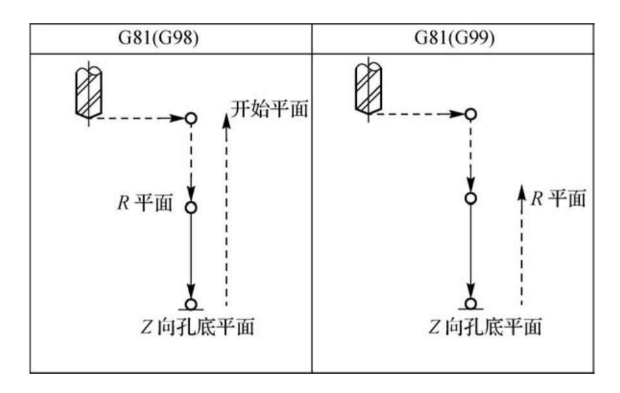


图 13－46　钻孔循环

（6）G83-深孔排屑钻

该指令的动作示意图如图 13－47 所示。

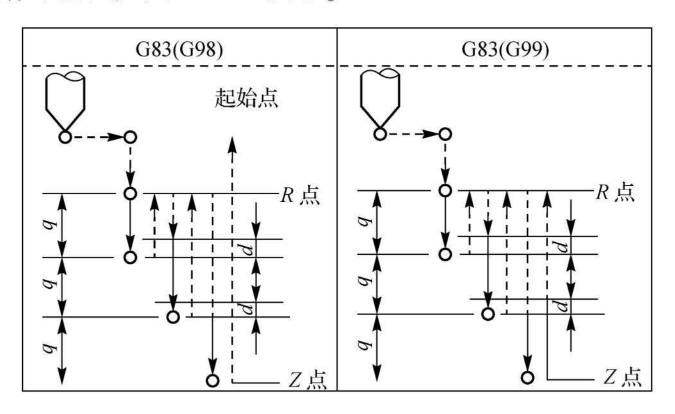


图 13－47　G83 循环

（7）G84-攻右旋螺纹

该指令的动作示意图如图 13－48 所示。在孔底位置主轴反转退刀。在 G84 指定的攻螺纹循环中，进给率调整无效，即使使用进给暂停，在返回动作结束之前不会停止。

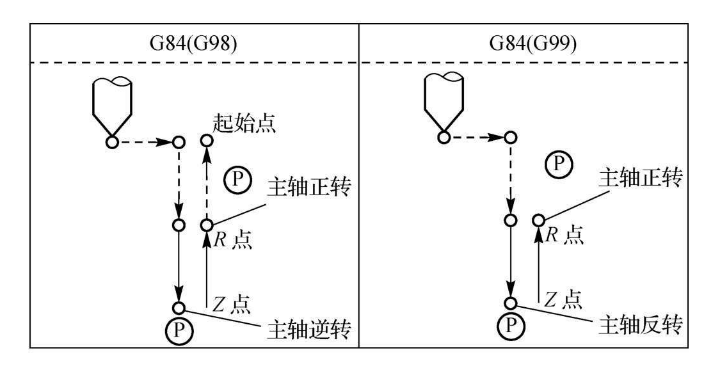


图 13－48　G84 循环

（8）G85——镗削

与 G81 类似，但返回行程中，从 Z—R 段为切削进给，如图 13－49 所示。

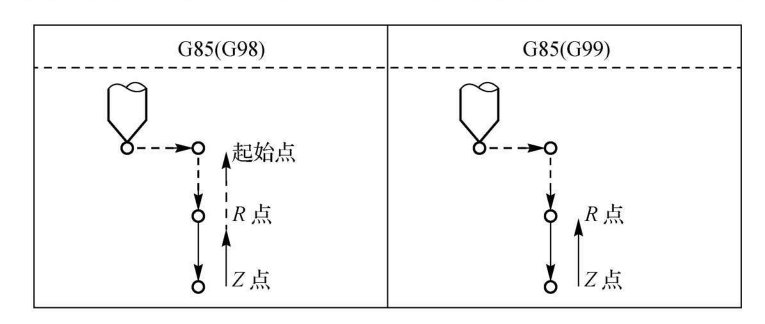


图 13－49　G85 循环

（9）G88——镗削

该指令 *X*、*Y* 轴定位后，以快速进给移动到 *R* 点。接着由 *R* 点进行镗孔加工。镗孔加工完，则暂停后停止主轴，以手动由 *Z* 点向 *R* 点退出刀具。由 *R* 点向起始点，主轴

正转快速进给返回。如图 13－50 所示。

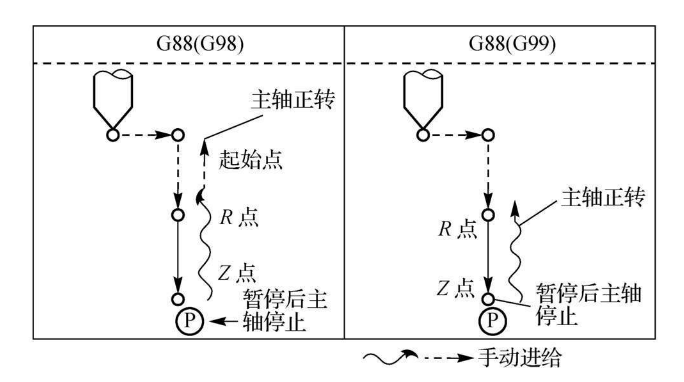


图 13－50　G88 循环

（10）G86——镗削

该指令与 G81 类似，但进给到孔底后，主轴停转，返回到 R 平面（G99 方式）或初始点（G98 方式）后主轴再重新启动。动作示意图如图 13－51 所示。

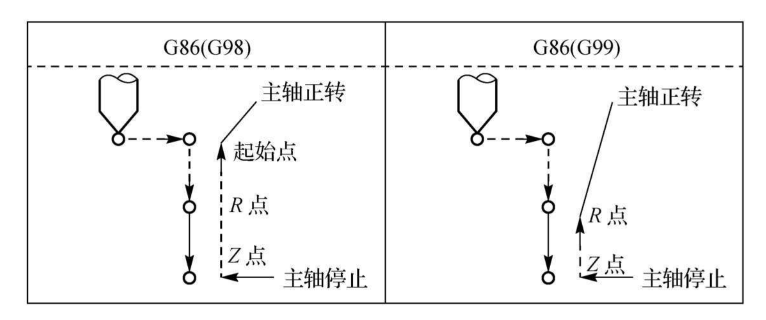


图 13－51　G86 循环

（11）G87——反镗

该指令 X、Y 轴定位后，主轴准停。让刀以快速进给率到孔底位置（R 点）后主轴正转，沿 Z 轴的正向到 Z 点进行加工。在这个位置，主轴再度准停，刀具退出，刀具返回到起始点后进刀。如图 13－52 所示。

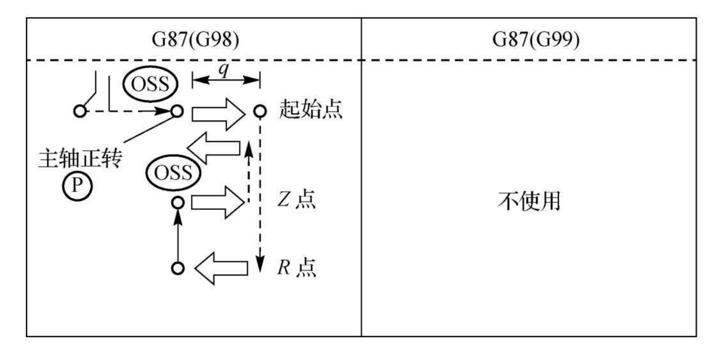


图 13－52　G87 循环

（12）G89——镗削

该指令与 G85 类似，从 Z—R 为切削进给，但在孔底时有暂停动作。如图 13－53

所示。

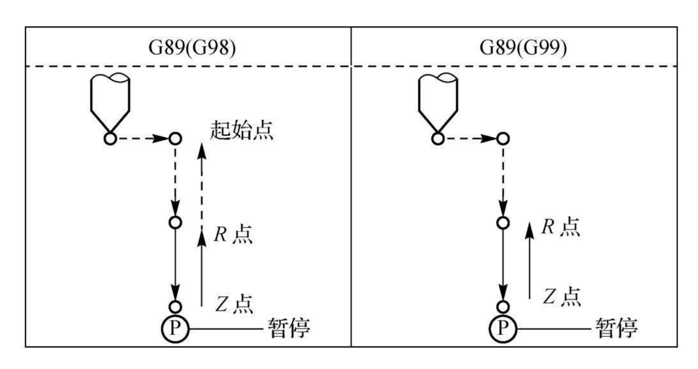


图 13－53　G89 循环

例 13.6：试采用重复固定循环方式加工如图 13－54 所示的各孔。刀具：T01 为 φ10 的钻头，长度补偿号为 H01。程序编写如下：

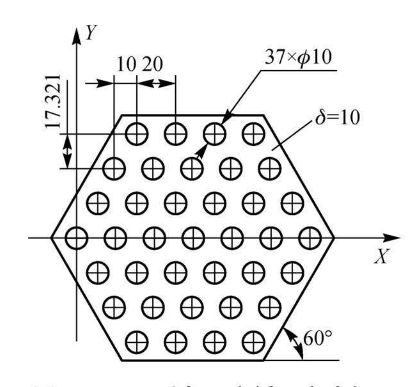


图 13－54　重复固定循环方式加工

```
O0010
N0010 G54G17G80G90G21G49T01;
N0020 M06;
N0030 M03S800;
N0040 G43G00Z20.0H01;
N0050 G00X10.0Y51.963M08;
N0060 G91G81G99X20.0Z-18.0 R-15.0 K4;
N0070 X10.0Y-17.321;
N0080X-20.0K4;
N0090X-10.0Y-17.321;
N0100X20.0K5;
N0110X10.0Y-17.321;
N0120X-20.0K6;
N0130X10.0Y-17.321;
N0140X20.0K5;
N0150X-10.0Y-17.321;
N0160X-20.0K4;
N0170X10.0Y-17.321;
N0180X20.0K3;
N0190G80M09;
N0200  G49 G90 G00 Z300.0;
N0210 G28 X0 Y0 M05;
N0220 M30;
```

7. 镜像功能

当工件具有相对于某一轴对称的形状时，可以利用镜像功能和子程序的方法，只对工件的一部分进行编程，就能加工出工件的整体，这就是镜像功能。不同的系统用

不同的指令，有用 M 代码的，有用 G 代码的。

M 代码的镜像功能：M21——相对 X 轴的镜像，M22——相对 Y 轴的镜像，M23——取消镜像。下面的程序就是 M 代码的镜像功能的使用实例（如图 13－55 所示）。

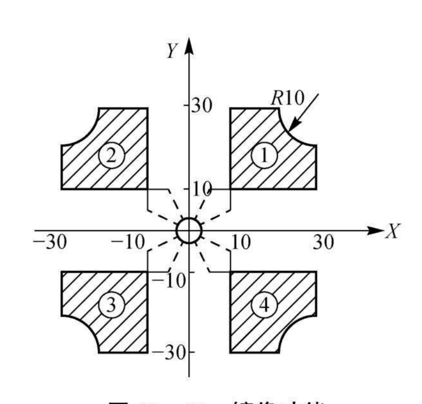


图 13－55 镜像功能

程序如下：

```
O0001;
N0010 G90 G17 G49 G54 T01;
N0012 M06;
N0013 M03 S800;
N0015 G43 G00 Z10.0 H01;
N0020 M98 P1000;
N0030 M22;
N0040 M98 P1000;
N0050 M21;
N0060 M98 P1000;
N0070 M23;
N0080 M21;
N0090 M98 P1000;
N0100 M23;
N0110 M05;
N0120 M30;
```

子程序（①的加工程序）：

```
O1000;
N100 G41 G91 G01 X10.0 Y4.0 D01;
N110 Y1.0;
N120 Z-98.0;
N130 G01 Z-7.0 F100;
N140 Y25.0;
N150 X10.0;
N160 G03 X10.0 Y-10.0 I10.0;
N170 G01 Y-10.0;
N180 X-25.0;
N200 G90 G40 X0 Y0;
N210 M99;
```

用 G51、G50 代码进行镜像编程。

8. 坐标系旋转功能——G68、G69

该指令可使编程图形按指定旋转中心及旋转方向旋转一定的角度。

G68 表示开始坐标旋转，G69 用于撤销旋转功能。

编程格式：

```
G68  X Y R ;
…
```

G69；

式中，X、Y——旋转中心的坐标值（可以是 X、Y、Z 中的任意两个，由当前平面选择指令确定）。当 X、Y 省略时，G68 指令认为当前的位置即为旋转中心。

R——旋转角度，逆时针旋转定义为正向，一般为绝对值。旋转角度范围：-360.0～+360.0，单位为 0.001°。当 R 省略时，按系统参数确定旋转角度。

当程序采用绝对方式编程时，G68 程序段后的第一个程序段必须使用绝对坐标指令，才能确定旋转中心。如果这一程序段为增量值，那么系统将以当前位置为旋转中心，按 G68 给定的角度旋转坐标。

以图 13－56 为例，应用旋转指令的程序为：

```
N10 G54 G00 X-5 Y-5
N20 G68 G90 X7 Y3 R60
N30 G90 G01 X0 Y0 F200
(G91 X5 Y5)
N40 G91 X10
N50 G02 Y10 R10
N60 G03 X-10 I-5 J-5
N70 G01 Y-10
N80 G69 G90 X-5 Y-5
N90 M30
```

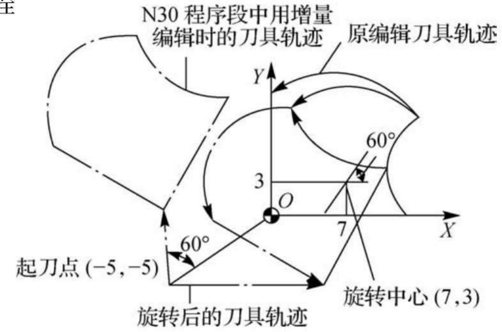


图 13－56　坐标系的旋转

（1）坐标系旋转功能与刀具半径补偿功能的关系

旋转平面一定要与刀具半径补偿平面共面。以图 13－57 为例：

```
N10 G54 G00 X0 Y0
N20 G68 R-30
N30 G42 G90 G00 X10Y10 F100 D01
N40 G91 X20
N50G03 Y10 I-10.15
N60 G01 X-20
N70 Y-10
N80 G40 G90 X0 Y0
N90 G69 M30
```

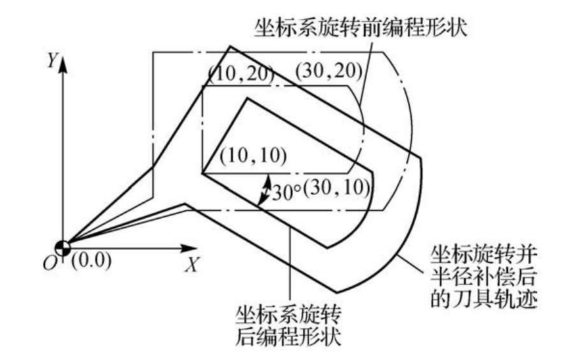


图 13－57　坐标旋转与刀具半径补偿

当选用半径为 R5 的立铣刀时，设置刀具半径补偿偏置号 H01 的数值为 5。



13.5　数控铣削加工实例

13.5.1　实例零件介绍

加工如图 13－58 所示零件。

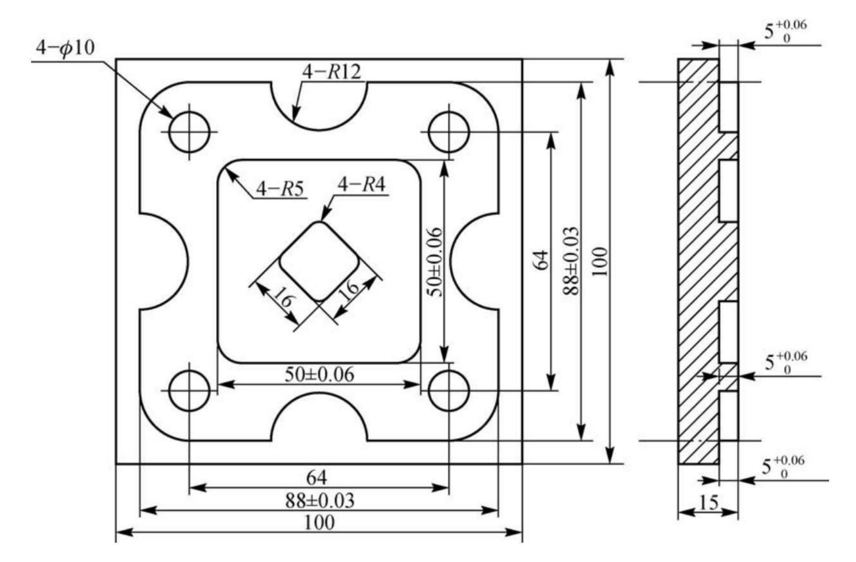


图 13－58　加工中心零件加工图

（1）材料为 45 钢，毛坯尺寸为：100mm×100mm×18mm，

（2）加工内容：

平面铣削、轮廓铣削、槽铣削、打定位孔、钻孔。

13. 5. 2　工艺分析

工艺设计（略），加工工艺清单如下：

工步号	程序段号	工步内容	刀具	切削用量		
1	NO. 1	粗铣顶面	端面铣刀	S 功能	F 功能	切深（mm）
2	NO. 2	精铣顶面	端面铣刀	S240	F300	2. 5
3	NO. 3	钻中心孔	中心钻	S830	F120	0. 5
4	NO. 4	钻孔	麻花钻	S1000	F100	深 1. 5
5	NO. 5	粗铣外轮廓	立铣刀	S550	F110	深 6
6	NO. 6	粗铣槽	立铣刀	S400	F150	2. 5
7	NO. 7	精铣外轮廓	立铣刀	S550	F110	2. 5
8	NO. 8	精铣槽	立铣刀	S550	F150	0. 3

13. 5. 3　实例编程操作

结合零件图纸要求，按照如下步骤进行编程操作：

1. 根据工艺要求，采用自动编程软件进行程序编制；
2. 制作程序存储介质；
3. 将存储介质内程序录入机床；
4. 根据自动编程内容，建立工件坐标系（编程坐标系），调整机床；
5. 程序的校验，首件零件加工；
6. 零件的质量分析，检测加工出来的零件精度是否达到要求，若达不到要求，则

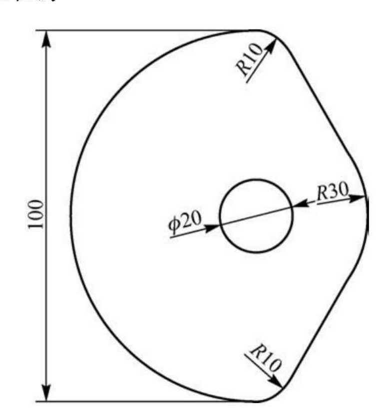
更改加工参数重新加工，直到加工出合格零件。

7. 加工零件。

参考程序（略）

思考题

1. 加工中心与数控铣床的区别是什么？
2. 如何建立刀具长度补偿？
3. 调用子程序有和作用？
4. 目前常用自动编程软件有哪些（列举 4 门软件）？
5. 编写如下零件的加工程序





第14章　特种加工

教学目的和要求：本章分别讲述电火花加工、激光加工、电子束加工、离子束加工、超声加工等几种典型的特种加工方式，使学生了解特种加工技术的原理、分类、发展及应用，并掌握电火花成型机床、电火花线切割机床的基本操作方法和使用激光切雕机床加工创意作品的简单流程。



14.1　特种加工概述

特种加工是指那些不属于车、铣等传统加工工艺范畴的加工方法。相比于使用刀具、磨具等直接利用机械能切除多余材料的传统加工方法，特种加工使用电能、热能、光能、电化学能、化学能、声能及特殊机械能等能量达到去除或增加材料的加工方法，从而实现材料被去除、变形、改变性能或被镀覆等。

由于特种加工使用的加工方法有别于传统加工手段，因此其具备许多传统加工手段具有不具备的优势，如加工力小、可加工各类难加工材料、加工柔性高、精度好、操作者劳动强度小等。正因如此，特种加工作为传统加工手段的有力补充，应用范围正在日益扩大，是机械加工领域的发展热点，也是未来机械加工领域的重点发展方向之一。



14.2　电火花加工

14.2.1　电火花加工技术概述

1. 电火花加工技术的原理

电火花加工是利用脉冲放电时产生的电蚀作用蚀除工件材料的特种加工方法（Electrical Discharge Machining 简称 EDM）。在加工时，工件和工具电极分别作为两级，之间的高压形成电火花，因此被称作电火花加工。

进行电火花加工时，工具电极和工件分别连接到脉冲电源的两极上，并浸入到具有一定绝缘性能的工作液中，或将工作液充入放电间隙。通过间隙自动控制系统控制工具电极向工件进给，当两电极间的间隙减小到一定距离时，两电极上施加的脉冲电压将工作液击穿，产生火花放电。在放电的微细通道中瞬时集中大量的热能，温度可

高达一万摄氏度以上，压力也急剧变化，从而使这一点工作表面局部微量的金属材料立刻熔化、气化，并爆炸式地飞溅到工作液中，迅速冷凝，形成固体的金属微粒，被工作液带走。这时在工件表面上便留下一个微小的凹坑痕迹，放电短暂停歇，两电极间工作液恢复绝缘状态。紧接着，下一个脉冲电压又在两电极相对接近的另一点处击穿，产生火花放电，重复上述过程。这样，虽然每个脉冲放电蚀除的金属量极少，但因每秒有成千上万次脉冲放电作用，就能蚀除较多的金属，具有一定的生产率。在保持工具电极与工件之间恒定放电间隙的条件下，一边蚀除工件金属，一边使工具电极不断地向工件进给，最后便加工出与工具电极形状相对应的形状来。因此，只要改变工具电极的形状和工具电极与工件之间的相对运动方式，就能加工出各种复杂的型面。

工具电极常用导电性良好、熔点较高、易加工的耐电蚀材料，如铜、石墨、铜钨合金和钼等。在加工过程中，工具电极也有损耗，但小于工件金属的蚀除量，甚至接近于无损耗。

工作液作为放电介质，在加工过程中还起着冷却、排屑等作用。常用的工作液是粘度较低、闪点较高、性能稳定的介质，如煤油、去离子水和乳化液等。

常用的电火花加工方法有电火花成型加工、电火花线切割加工等。

2. 电火花加工技术的应用

电火花加工主要用于高硬度、高强度、高韧度和高熔点导电材料的加工。同时电火花加工技术具有加工精度高、加工柔性大、加工范围广等特点，因此尤其适用于加工具有复杂形状的型孔和型腔的模具和零件，其常见应用如下。

（1）穿孔加工电火花加工常应用于加工各种类型的孔，具有加工精度高、加工变形小等优点，其最小可加工 0.01mm 的微细小孔，因此常被应用于各种精密模具、工具、精密仪器上的微小孔加工。

（2）型腔及曲面加工电火花加工亦可应用于加工各类平面和曲面，例如各种模具的型腔、叶片等复杂零件的表面曲面等。应用电火花加工此类零件的优势在于电火花可以切割硬度很高的材料，因此毛坯可在淬火后再进行加工，不存在工件热处理变形的问题。

（3）电火花切割利用电火花可加工高硬度材料的特点，可将其应用于切割各种高硬度材料。例如对于高硬度刀具、模具的切割，及各种高硬度金属的切割；

（4）其他应用电火花加工还可应用于对加工完成的平面进行磨削、镗削等精加工，以及对零件进行表面处理和表面打标等。

14.2.2　电火花成型机床简介

1. 电火花成型机床结构与加工原理

训练使用 DM7145 型电火花成型机，其结构如图 14－1 所示。

DM7145 型电火花成型机加工机床由床身、工作液循环箱、主轴头、头柱、工作液槽和电源箱等部分组成。各部分功能为：

（1）床身支撑机床各部件；

（2）工作液循环箱将工作液循环过滤，并通过液泵加压后泵入电极与工件之间的放电间隙里，从而将电火花加工时从工件表面剥离的碎屑及时冲走；

（3）工作液槽在机床加工时储满工作液，待加工工件放置于槽内，保证工作液能

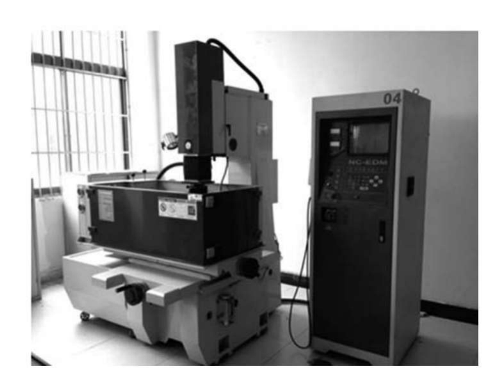


图 14－1　DM7145 型电火花加工机床

将工件浸没，实现持续加工和对工件的保护；

（4）主轴头通过伺服进给机构控制工具电极和工件之间保持稳定的间隙，保证在加工精度的稳定和加工的持续性；

（5）立柱承受主轴负重和运动部件突然加速运动的惯性力；

DM7145 型电火花成型机加工机床由操作面板进行控制操作，操作面板功能如表 14－1 所示。

表 14－1　DM7145 型电火花加工机床操作面板按键说明

按键	功能
功能键 F1-F10	设定或执行功能
数字键：0-9	输入数字用，包括坐标位置及 EDM 参数
ENTER 键	确定输入键
YES/NO 键	询问回答键（是/不是）
退格键	用于删除错误输入
移动键	用于程式编辑及轴向选择

2. 基本操作

（1）设备归零与坐标设定。在每次开启设备时，需要首先将设备归零，之后建立工作坐标。设备归零的具体操作为：

①按“F4”进入位置归零状态，此时电流自动改为 0，Z 轴不抬刀，跳出后自动恢复原设定值；②使用游标移到归零轴向；③按“F4”位置归零，最后按“Y”归零确认；

建立工作坐标的具体操作为：

①将光标移动到归零轴；②按“F5”（位置设定）；③输入需设定的数字后按“ENTER”确定；

（2）编辑加工程序。在开始加工前若需要编辑加工程序，具体操作为：

①按“F3”键进入程式编辑器，使用“上下左右”键移动游标至编辑栏位；②在 Z 轴输入栏输入数字；③使用 F3 与 F4 更改 EDM 参数；④编辑程式（使用 F1 插入所需单节，此时系统会将光标所在单节拷贝到下一单节；使用 F2 删除不要的单节）；⑤编辑完成后使用 F8 跳出编辑；

（3）设定加工参数。程序编辑完成后，需设置设备的加工参数，具体步骤为：

①按“F8”键进入参数设定；②选择参数设定项目（机械参数、工作参数、颜色、EDM表），移动光标到所需设定参数的位置；③进行设定；

（4）开始自动加工。各项准备工作都完成后，将工件装卡完成，并开始进行加工，具体步骤为：

①按下“F2”进入自动加工功能；②通过光标选择预备执行之单节（程式执行时由单节号码少的节数向节数大的单节执行，而执行的状态可从状态栏看到，在放电中可按“F7”键修改放电条件）；③开始放电加工；④加工结束（当加工程序执行完成后，Z轴会自动上升至安全高度）。

14.2.3　电火花数控线切割机床简介

1. 数控线切割机床结构与加工原理

数控线切割加工是电火花加工的一种。在加工时，数控线切割机床利用金属丝（钼丝、钨钼丝）与工件分别构成正负极，并通过脉冲放电使电极之间产生脉冲火花，利用此时产生的电腐蚀效应来对工件进行加工，同时利用数控系统控制工件与金属丝的相对移动，以达到成形的目的。

数控线切割机床的基本原理为：钼丝和工件都被浸没在有一定绝缘性的工作液中，被加工的工件作为阳极，钼丝作为阴极；开始加工时，脉冲电源发出一连串的脉冲电压，使工件和钼丝分别加上正负电压；当钼丝与工件之间的距离减小到超过工作液绝缘阈值时，在工件和钼丝之间电压的作用下，工作液被电离击穿，钼丝与工件之间形成放电通道，高压电流在工件上产生瞬时高温，使金属局部由于高温作用而产生熔化甚至汽化现象，实现对放电部位的加工。当数控系统驱动工作台带动工件不断进给时，放电部位不断移动，就能在工件上切割出所需的形状。由于线切割采用单向脉冲放电，使被蚀除的现象主要发生在工件上，并且贮丝筒带动钼丝做正反向交替的高速运动，所以钼丝蚀损的速度较慢，可以使用较长的时间。

数控电火花线切割机床适用于加工具有较高硬度、强度、韧度、熔点等特殊导电材料。此类材料若使用传统的加工方式对刀具损耗大、加工精度较差。若使用线切割加工，则加工时由于钼丝与工件不直接接触，故而不存在切削力，有利于提高加工精度、降低损耗。利用线切割加工尺寸精度可达0.02～0.01mm，表面粗糙度$Ra \leq$ 2.5μm，切割速度最快为100mm2/min。

训练使用DK7732Z型数控电火花线切割机床，整个系统包括机床、脉冲电源和数控装置三大部分，其构成如图14－2所示。

（1）机床本体

机床本体由实现机床运行功能的所有机械结构构成，包括床身、运丝机构、丝架导丝机构、数控坐标工作台、冷却系统组成。

1）床身　机床所有部件都由床身进行支撑，床身本身固定在地面上；

2）运丝机构　运丝机构由贮丝桶、交流电机、丝架构成，其作用是通过贮丝桶的转动，带动贮丝筒上的钼丝通过丝架做反复变换方向的送丝运动，使钼丝在整体长度上均匀参与电火花加工，从而可以使加工时精度保持稳定，同时可延长丝的使用寿命。

3）丝架导丝机构　丝架导丝机构负责保证钼丝和工件之间的相对垂直，保证加工的持续进行。其功能是通过丝架和拖板实现的，丝架负责支撑钼丝并保持钼丝的角度，



图 14－2　DK7732Z 型电火花线切割加工机外形图

拖板负责控制丝架的相对位置。

4）数控坐标工作台　待加工工件被装卡在数控坐标工作台上，通过数控工作台的移动带动工件在 X、Y 两个方向的进给运动，实现工件的进给运动。DK7732Z 型机床使用电机丝杠机构实现工作台的移动，步进电机每旋转一个步距角，通过变速齿轮驱动滚珠丝杠使工作台在相应的方向上移动 0.001mm。

5）冷却系统　电火花加工时，放电过程并非持续，而是以脉冲形式放电的，这样可以控制每次放电时的放电量，控制加工质量。因此，每次脉冲放电后，工件与钼丝之间必须迅速恢复绝缘状态，避免产生稳定持续的电弧放电。冷却系统通过保持工作液的循环，将加工过程中产生的碎屑从电极之间带走，从而维持工件与钼丝之间的绝缘性，使加工顺利进行。同时，在加工时电极和工件都会产生很大的热量，通过工作液的冷却作用，可以防止工件受热变形。DK7732Z 型机床的冷却系统由工作液、工作液箱、工作液泵和循环导管组成。

（2）脉冲电源

脉冲电源负责提供电火花线切割加工所需要的脉冲放电电流，由振荡器及功放板组成。根据工件的材料、厚度的不同，控制调整振荡器的振荡频率、脉宽和间隔比，从而调整脉冲电源输出的电流大小和持续时间。在加工时钼丝接电源的负极，工件接电源的正极。

（3）数控装置

数控装置负责控制线切割机床各部件的运转、进给运动及脉冲放电，是整个数控线切割机床的“大脑”。在运行时，数控装置通过分析从机场各传感器输入的信号后，经过内部软件的编译、运算和逻辑处理，最终输出各种驱动信号，驱动机床各部件执行所需要的动作。

2. 基本操作

（1）设备调试与准备

1）启动前检查　在启动机床前，首先检查电极丝是否已磨损，若无法满足加工要求则及时更换；之后检查机床的润滑工作是否正常，工作液是否满足加工要求；

2）启动机床　打开机床电源，并控制机床空载运行，观察其各系统是否能正常运行；

3）穿丝　将电极丝盘安放在上线架的上丝装置上，按“挡丝棒—断丝保护—导电块—下导轮—上导轮—张紧轮—后导轮—储丝筒”路线穿丝，并将电极丝末端固定于

储丝筒的压丝螺钉上。之后使用机床摇把逆时针方向转动储丝筒，使电极丝均匀紧密地排列在储丝筒上，穿丝完成后，将电极丝末端固定于储丝筒另一侧的压丝螺钉上，同时调整行程开关位置；

4）检查调节紧丝轮　将电极丝慢慢张紧，启动运丝电机使储丝筒旋转起来，在旋转到接近电极丝末端位置时关闭运丝电机，此时松开压丝螺钉重新压紧电极丝，之后检查电极丝松紧（有一定的弹性为宜），若过松则重复上一步骤（注意紧丝时手动操作，不可将储丝筒逆时针旋转紧丝，以防过紧把电极丝拉断）；

（2）装卡工件

使用通用或专用卡具将工件固定在工作台上，安装完成后根据图纸要求用千分表找正工件的基准面，最后检查工件位置是否在工作台行程的有效范围内；

（3）载入加工文件

数控线切割机床在进行加工时，需要首先载入预先在计算机上编辑完成的图纸。可通过从图库调入或从硬盘调入文件。调入完成后，若需要修改文件，可在主菜单下，按“F”键，选择需修改的文件，按回车键即可显示该文件的 3B 指令。编辑时首先按“INSERT”键，之后使用“上、下、左、右”箭头及空格键进行修改，修改完毕，按“Esc”退出；

在仅加工一个简单的图形时，可采用手工输入 3B 指令的方式提高效率。操作方法为：在主菜单下按“B”键，再按回车键，即可按标准格式输 3B 指令。

（4）模拟加工

加工文件调入完成后，为了验证图纸坐标是否正确，避免在正式切割时因编程错误或加工参数设置不当而造成工件报废，可先进行模拟加工操作。操作如下：

在机床控制软件的主菜单下按“X”键，设备显示虚拟盘加工文件，选择需要模拟切割的 3B 指令文件，即显示出待加工图形。通过“+、-”键和“上、下、左、右箭头”调整图形的比例和位置；

若加工的是平面工件，按“F4”、回车键，即显示终点 X、Y 回零坐标。

（5）正式加工

1）模拟加工　确认无误后，启动各子系统，即可进行正式切割操作；

2）选择加工文件　在主菜单下，选择加工#1，按回车键、“C”键，显示加工文件，选择要切割的 3B 文件，按回车键，预览该指令切割的图形，并调整图像大小比例及位置；

3）调整加工参数　按“F3”键，弹出加工参数设置子菜单，对加工参数进行相应设置，设置完毕后按“ESC”退出；

4）开始加工　首先按“F12”键锁定进给（此时进给菜单由蓝底变浅绿，再按“F12”键则松进给），之后按“F10”键选择自动（此时菜单由浅绿底变蓝，若需要手动则再按“F10”键），最后按“F11”键启动高频电源，开始切割。（再按“F11”键关高频）



14.3　激光加工技术

14.3.1　激光加工技术概述

1. 激光加工技术的原理

原子核外电子可在有限的轨道上绕核旋转，具有一定的能量（动能和势能）——谓之处在一定的能级。电子可在能级之间跃迁：吸收外部能量（光子），从低能级跃迁到高能级；若从高能级跃迁到低能级，则发射光子。

正常情况下，大多数电子处于低能级，通过注入外能可使基态的电子激发到高能级上去。处于激发态 E2 的电子会自发地向低能级基态 E1 跃迁放出光子（自发辐射）$h\nu = E2 - E1$；也可受光子 $h\nu$ 的激发而发射相同的光子 $h\nu$（受激辐射）它的频率、相位、传播方向和偏振态完全相同。

当外界给特定介质提供能量时，受激吸收占优势，可使高能级亚稳态上的电子数大于低能级上的电子数。在此状态下，若有一束光通过介质，而光子的能量恰好等于高低能级的能量差 $h\nu = E2 - E1$，就可以产生受激辐射，从而实现受激辐射光放大。

由此可见，激光的产生需要下列三要素：

（1）激光工作物质：提供产生激光所需的大量同频率光子；

（2）外界泵浦源：为工作物质注入能量，使其受到激发；

（3）激光谐振腔：维持激光振荡，使工作物质持续输出光子；

激光器的基本构造如图 14－3 所示：

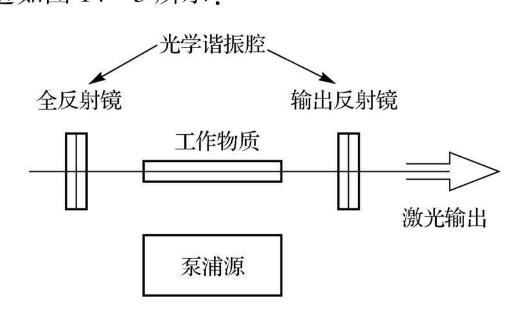


图 14－3　激光器的基本构造

激光加工技术是利用激光束与物质相互作用的特性对材料（包括金属与非金属）进行切割、焊接、表面处理、打孔及微加工等的一门加工技术。

由于激光束具有能量密度高、方向性好等特点，因此在利用激光进行加工时，具有加工精度高、加工速度快、安全可靠、材料适应范围广等优势。因此，激光加工技术自诞生来就受到各界的青睐，广泛应用于各类机械加工场合，且其技术水平和应用领域依然处于飞速发展和扩张中。

2. 激光加工技术的应用

目前已经成功实现产业化的激光加工工艺主要有下列几种。

（1）激光切割：激光切割是在计算机数控系统控制下，利用激光束直接对工件进行切割。由于激光加工时几乎不会对周围区域造成影响，因此激光切割不会使加工材料变形或起皱，且尺寸精度高，可在计算机上修改切割形状后直接加工，加工的快速性和柔性都很高。

（2）激光焊接：激光焊接是利用激光的能量把焊件的结合部位熔化，使之冷却后黏合在一起。激光焊接精度高、温度高、无污染，可实现同种材料、不同种材料甚至于金属与非金属材料的焊接。

（3）激光打孔：利用激光束能量密度高、焦点小的特点可以实现对坚硬材料的打孔加工，激光打孔的深径可达 50~100，且几乎可以对所有金属材料和非金属材料进行打孔加工。

（4）激光打标：激光打标是利用高能量密度的激光对工件进行局部照射，将工件表面材料进行剥离，从而使事先设计好的图形、文字或商标永久标记在工件表面的一种工艺。

（5）激光内雕：激光内雕利用两束激光从不同的角度射入透明物体，准确地交汇在一个点上。激光在交点上发生干涉和抵消，其能量由光能转换为内能，放出大量热量，将该点融化形成微小的空洞，由计算机控制反射镜使激光束在物体内部移动，则大量空洞就形成了所需要的图案。

（6）激光热处理：激光热处理是一种表面热处理技术。即利用激光加热金属材料表面实现表面热处理。

14.3.2　激光切雕加工机床简介

1. 激光切雕机床原理

激光切雕机利用二氧化碳激光器产生激光，在通过反射镜的反射后聚焦到工作平台上，通过控制反射镜的移动，可以实现激光在工作平台上的移动，实现加工过程。训练采用 LCC80 型激光切雕机，该设备最大加工能力 1100mm×500mm，其构造如图所示。



图 14－4　激光切雕机的结构

1）工作平台　工作平台用于放置待加工材料，平台表面开有小孔，加工时激光烧蚀材料产生的烟尘通过小孔被抽气系统抽出。

2）激光器　华工激光 LCC80 型激光器采用二氧化碳激光器，适合加工木材、布料、塑料、纸张等非金属材料。

3）激光反射镜　激光器产生的激光通过激光反射镜的反射和聚焦后照射到待加工材料表面，实现加工过程。

4）移动导轨　移动导轨由计算机控制，根据加工图纸进行移动，进而实现激光反射镜的移动，加工实现图纸所要求的尺寸和形状。

5）控制面板　控制面板由加工状态显示屏和操作按钮组成。加工状态显示屏可显示当前的加工图纸和加工完成情况，操作面板用于手动控制激光切雕机的各项功能，

操作面板的具体功能介绍如表 14－2 所示。

表 14－2　LCC80 型激光切雕机操作面板功能介绍

按键	功能
设置	用于设置机床的参数功能，或调入已存储在机床内部的加工图纸
原点	将激光反射镜返回到坐标原点
暂停/恢复	可对加工过程进行暂停/恢复操作
退出	机床参数设置完成后使用“退出”键退出菜单
测试	控制激光反射镜根据图纸尺寸空走，验证加工范围是否超出了板材
开始	开始加工
预调	控制激光器点射一束激光，方便进行焦点调整
停止	停止加工过程
“↑↓←→”	手动控制激光反射镜移动



14.4　其他特种加工技术

14.4.1　电子束加工

1. 电子束加工的基本原理

电子束加工（EBM，Electron Beam Machining）是在真空条件下，利用电流加热阴极产生带负电荷的电子束，电子束在经过加速极加速后高速飞向阳极，利用电磁场对电子束聚焦后，产生能量密度很高的高速电子流，将高速电子流聚集到待加工工件表面，高速电子流撞击待加工工件表面时，电子流携带的动能几乎全部转化为热能，迅速将待加工工件表面被电子流冲击部位的温度在极短时间（约百万分之一秒）内升高到几千摄氏度以上，从而使材料瞬时熔化、气化直到蒸发。配合聚焦点的运动或工件装卡工作台的运动，即可实现所需要的加工尺寸。电子束加工的基本原理如图 14－5 所示。

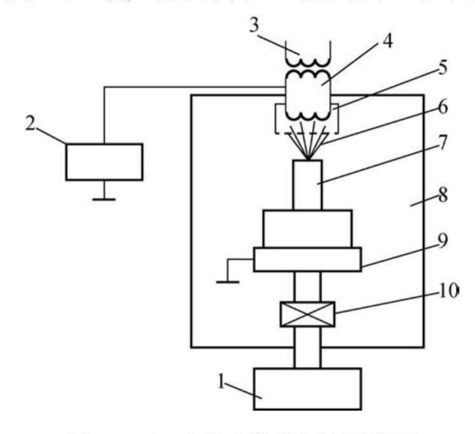


图 14－5　电子束装置原理示意图

1—变速装置；2—高压电源；3—交流总电源；4—钨制灯丝；5—电子枪组件
6—聚焦电子束；7—工件；8—真空室；9—工作台；10—轴承

随着电子束加工技术的不断发展，目前已可以把 1kW 或更高的能量集中到直径为 5～10μm 的斑点内，获得高达 109W/cm2 的能量密度。由于加热时间短、温度升高快，热量来不及向周围扩散，因此在利用电子束加工时容易控制加工区域，可以实现微细、亚微米乃至毫微米加工，尤其适用于微电子领域的大量电子元器件的加工。

2. 电子束加工的特点

由于电子束加工的原理不同于传统的机械加工方式，因此其加工特点不同于许多传统的加工方式。

（1）电子束加工的加工材料范围很广。由于电子束加工是一种非接触式加工，工件不受机械力作用，不产生宏观应力和变形，因此其对加工材料的限制小，可加工各种硬脆性、韧性、导体、非导体、热敏性、易氧化材料。

（2）电子束在磁场聚焦后可以达到很高的能量密度，同时利用磁场的控制可以迅速改变聚焦点。因此电子束加工具有速度快、生产效率高的特点（例如，每秒钟可以在 2. 5mm 厚的钢板上钻 50 个直径为 0. 4mm 的孔）。

（3）由于利用强磁场可以将电子束聚焦到很小的范围上（um 尺度），且电子束在加工时其能量集中在焦点释放，对焦点周围的影响很小，所以电子束加工精度很高，是一种精密微细的加工方法。

（4）电子束加工主要靠高能电子束在聚焦点产生的高温对材料加工，由于加工时温度远超材料的熔点，材料被瞬时蒸发，工件很少产生应力和变形。且由于加工是在真空室内进行的，加工完成的表面不会受到氧气等杂质污染。

3. 电子束加工的应用

根据功率密度和能量注入时间的不同，电子束加工技术可应用于不同的加工用途，如打孔、切割、焊接、蚀刻、光刻、热处理等。

（1）打孔：利用电子束进行高速打孔已在生产中实际应用。目前利用电子束可加工最小直径 φ0. 003mm 的小孔。电子束打孔还能加工小深孔，如在叶片上打深度 5mm、直径 φ0. 4mm 的孔，孔的深径比大于 10∶1。

（2）切割：电子束可以用来切割各种复杂型面。由于电子束由磁场进行聚焦控制，加工轨迹可方便地由计算机控制磁场改变来进行调整，因此电子束可以加工各种复杂的型面。

（3）焊接：利用电子束在工件表面释放的高温作为热源可以实现电子束焊接工艺。由于电子束产生的温度高，且加工过程是在真空环境中进行，因此电子束焊接可以焊接各种难熔金属（如铜、钼等）、也可焊接化学性能活泼的金属（如钛、铝、铀等）。电子束焊接还能完成一般焊接方法难以实现的异种金属焊接。

（4）蚀刻：利用电子束在混合电路电阻的金属镀层上刻出线条，这种工艺被称为电子束刻蚀，已被广泛应用于微电子器件生产中。

（5）热处理：使用电子束作为热源，通过精确地控制电子束功率密度使金属表面加热被加热到特定温度，再进行适当的冷却，即可实现热处理工艺。由于使用电子束进行热处理时加热速度和冷却速度都很快，奥氏体晶粒来不及长大，可以获得一种具备高硬度的超细晶粒组织，大幅提高工件的表面硬度。

14. 4. 2　离子束加工

1. 离子束加工的基本原理

离子束的加工原理类似于电子束加工，同样是在真空条件下对粒子进行加速、聚焦后，利用粒子束冲击工件表面待加工部位，粒子束携带的能量在工件表面释放后将工件表面物质剥离，实现加工目的。所不同的是离子束加工使用的是氩（Ar）、氪（Kr）、氙（Xe）等惰性气体，其原子质量比电子的质量大千万倍。例如最小的氢离子，其质量是电子质量的1840倍，氖离子的质量是电子质量的7.2万倍。由于离子本身的质量大，所以对其施加同样的加速电场时，其加速较慢，最终得到的离子束速度较低。但是，若将其加速到较高的速度，由于离子质量远比电子大，因此离子束可以携带更大的能量。

2. 离子束加工的特点

由于离子束加工与电子束加工的相似性，故其具有与电子束加工类似的特性，具体表现如下。

（1）加工精度好。通过采用特定的聚焦系统对离子束进行聚焦扫瞄，可将离子束的光斑精确聚焦到1μm范围内，从而实现传统加工方式难以达到的加工精度。如果更进一步对离子束流密度和离子的能量进行精确控制，可以实现亚微米级的加工精度，例如使用离子束将工件表面的原子一层一层的去处，实现传统车铣加工难以企及的加工精度。

（2）材料适应性强。离子束加工不需要使用任何刀具、加工应力和变形都非常小，因此材料适应性很强。可用于加工各类金属、非金属材料，尤其适合加工具有高强度、高硬度、高脆性的材料。

（3）对材料污染少。由于离子束加工需要在真空环境下进行，且不适用切削液、冷却液等液体，因此对工件的污染少，工件不需要做特殊防护即可加工。但需要注意的是，由于需要建立真空环境，离子束加工系统的建造和维护成本都很高，这也限制了其进一步的推广。

3. 离子束加工的应用

由于离子束加工具有传统加工手段难以具备的特性，因此在特种加工领域离子束加工的应用范围日益扩大，离子束加工技术的发展也非常迅猛。目前离子束加工的应用主要有两个方向，一是用于改变零件尺寸的去除加工；二是用于改变零件表面物理力学性能的注入加工。具体的工艺可分为：离子束刻蚀加工、离子束镀膜加工、离子束注入加工等。

（1）离子束刻蚀加工是指使用离子束将工件表面的材料去除。例如利用离子束刻蚀用于精密仪器的高精度轴承沟槽，或用于在微电子元器件、精密传感器的表面刻蚀电路和沟槽，其加工精度可以达到亚微米级；

（2）离子束镀膜加工是指利用离子束对工件表面的轰击实现在工件表面镀上一层特殊保护膜的工艺。离子束镀膜具有附着力强、膜层不易脱落的特点。由于离子束加工广泛的适应性，故应用离子束镀膜时可以实现多种金属、非金属材料的镀膜。例如在表壳或表带上镀氯化钛膜，使其耐磨性和耐腐蚀性大大提高；或在工艺美术品表面镀上特殊的图案形状等。

（3）离子束注入加工是指将组成离子束的离子直接注入工件表面，使离子固溶在

工件材料内，实现对工件材料特性的改善。其典型应用为利用离子束注入工艺在半导体表面制造 PN 结；或利用离子束注入工艺改变金属表面材料构成，从而使材料的物理化学性能，达到改善材料抗蚀性能、抗疲劳性能、润滑性能和耐磨性能等目的。

14.4.3　超声加工

1. 超声加工的基本原理

超声加工是利用超声波产生的机械振动实现加工目的的所有加工方法的统称。常用的超声加工方法有超声磨削加工和超声焊接等。这里我们重点介绍超声磨削加工的原理。

超声磨削加工利用工具端面高频振动产生超声波，在工具和工件待加工表面之间填充液体或固体磨料，超声波在磨料内传播，对磨料产生冲击，磨料的冲击传导到工件表面，并形成抛磨、液压冲击及气蚀现象，实现去除材料的目的。超声加工尤其适合于加工脆硬材料。其加工原理如图 14－6 所示。

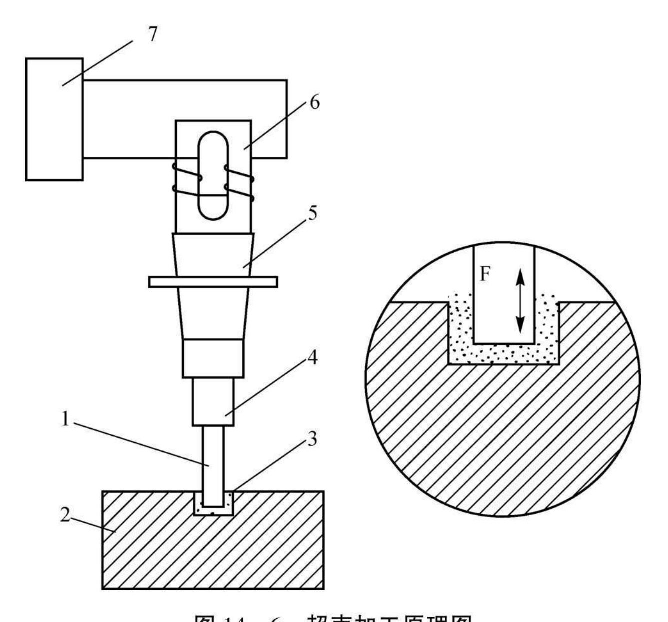


图 14－6　超声加工原理图

1—工具；2—工件；3—磨料悬浮液；4、5—变幅杆；6—超声换能器；7—支撑立柱

超声加工的工艺过程由以下几步组成：加工前，在工具 1 和工件 2 之间填充满磨削液 3（由溶剂和磨料混合组成的悬浮液），对工具 1 施加一个较小的压力使其可以轻压在工件上；加工开始时，压电晶体构成的超声换能器 6 产生高频的超声振动，使工具 1 开始作高频纵向振动，此时磨削液中的磨料受到振动能量的驱动而以很大的速度和加速度不断冲击被加工表面，从而实现对工件被加工表面材料的去除；由于超声振动的频率很高（16 000Hz 以上），虽然每次加工去除的材料很少，但整体的加工效率依然可观。同时，高速流动的工作液会在工件表面产生液压冲击波和“空化”作用，使工作液更容易进入到工件表面的微裂缝中，产生更加显著的加工效果（“空化”作用，是指超声加工时，当工具端面离开工件表面时，工具端面和工件表面之间的间隙内会形成负压和局部真空，在磨削液内部产生空泡，当工具端面再次接近工件表面时，空

泡重新闭合，形成微小但能量很高的液压冲击波，从而强化了加工过程）

2. 超声加工的特点

超声加工利用磨料和工件之间的撞击作为加工手段，其原理的特殊性使其具有其它加工手段不具备的特性，具体表现为下列几个方面。

（1）对于各种脆硬材料有较好的加工效果。由于脆硬材料不耐冲击，在超声冲击下去除作用明显，因此超声加工常用于加工各类脆硬材料，例如玻璃、陶瓷（氧化铝、氮化硅等）、石英、锗、硅、玛瑙、宝石、金刚石等。

（2）超声加工机床结构简单。由于超声加工工具使用的材料较软，成型容易，一般将工具直接制作成所需的加工形状。在超声加工时工具和工件之间不需要作比较复杂的相对运动，仅需要使超声加工机床保持一个方向的进给运动即可，因此可以简化机床结构，相应的操作和维修都很方便。

（3）加工精度好。超声加工时撞击作用力作用于微观层面，整体的宏观切削力很小，切削应力、切削热很小，不会引起变形及烧伤，表面粗糙度也较好，可达 $Ra1 \sim 0.1\mu m$，加工精度可达 0. 01～0. 02mm，而且可以加工薄壁、窄缝、低刚度零件。

3. 超声加工的应用

超声加工的应用始于20世纪50年代，最初仅应用于成型加工领域。随着技术的进步和市场的需求，超声加工的应用日益广泛。目前，超声加工已涵盖多个应用领域，且广泛应用于工业生产中。

（1）超声成形加工：利用超声加工适于加工各种硬脆材料的特点，超声成型加工工艺被广泛应用于在各种硬脆性材料上打孔、开沟槽、开型腔等。

（2）超声切割加工：利用超声振动切除的原理对材料进行切割加工，具有切片薄、切口窄、精度高、生产率高、经济性好的优点，因此适用于对半导体、铁氧体、石英、宝石、陶瓷、金刚石等硬脆材料的切割工艺。

（3）超声焊接加工：利用超声高频振动两个紧密贴合的被焊工件，使焊件表面分子在高速振动下加速相互扩散，最终将焊件互相粘接在一起。超声焊接工艺对材料适应性强，可实现异种材料直接的焊接，甚至是金属和非金属之间的焊接，例如可以实现在陶瓷等非金属表面涂挂一层金属薄层。

（4）超声清洗：超声清洗是利用超声高频振动清洁液，使清洁液高速冲击工件表面实现清洗过程。主要适用于形状复杂、清洗质量要求高的精密零件，其对深孔、沟槽、窄缝等传统清洗手段难以清洗的结构有很好的清洗效果，因此得到大规模的推广使用。



14. 5　激光切雕加工训练实例

14. 5. 1　训练材料

KT 板：KT 板是一种由聚苯乙烯颗粒经过发泡生成板心，经过表面覆膜压合而成的一种新型材料，板体轻盈、不易变质、易于加工，广泛用于广告展示促销、建筑装饰、文化艺术包装等方面。

14. 5. 2 绘制图纸

这里我们使用 AutoCAD 软件绘制加工图纸（关于 AutoCAD 软件的相关操作读者可参考学习有关书籍，在此本书不再赘述）图纸绘制完成后，将图纸保存为 AutoCAD 2004（＊dxf）格式。图 14－7 为一个绘制完成的 KT 板加工图纸样例。

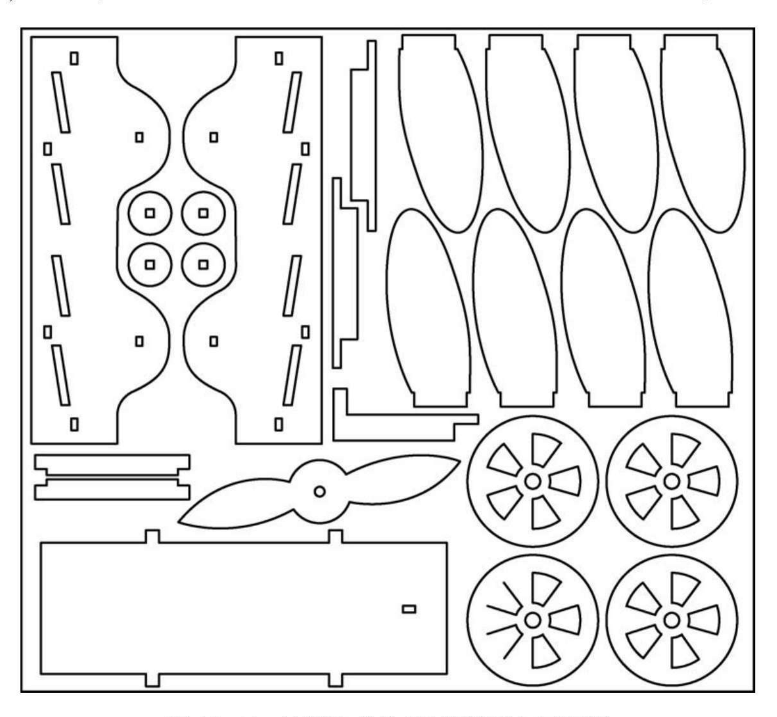


图 14－7 绘制完成的 KT 板模型加工图纸

14. 5. 3 设备加工

使用 LCC80 型激光切雕机完成加工过程。操作步骤如表 14－3 所示。

表 14－3 LCC80 型激光切雕机操作步骤

序号	操作简图	操作内容	步骤
1		设备开机 打开空气开关（电源）→打开控制计算机→顺时针拧动启动钥匙→打开电源开关→系统上电； 启动控制软件 鼠标左键双击桌面上名为 PowerCut 的激光切雕机控制软件	启动设备

续表

序号	操作简图	操作内容	步骤
2		载入设计图纸　鼠标左键单击软件左上角“文件”选项→选择“导入”→选择要导入文件→左键单击“确定” 调整加工参数　鼠标左键双击右侧状态栏中“图层”选项→在弹出对话框中设置激光器输出参数，并点击“应用”按钮确定参数设置，如左图所示	调整加工参数
3		将加工文件下传到激光切雕机　鼠标左键单击右侧状态栏中“加载”选项→在弹出的对话框中选择“下传文件”选项	加载文件
4		调整激光器聚焦点　通过拧动激光反射镜上的旋钮，使激光反射镜上下移动调节焦距，再通过控制面板上“输出”按钮输出激光观察调节效果；如图 14－12 所示	调整焦距

续表

序号	操作简图	操作内容	步骤
5		试切　将待加工材料放置到工作平面后，点击控制面板上“测试”按钮，激光反射镜将在移动导轨的带动下绕加工图纸最大范围空行程走一圈，观察加工范围是否超出了材料面积切雕加工 确认材料放置在加工范围内后，关闭安全门，点击控制面板“加工”按钮进行加工，此时加工状态显示屏上会显示“加工进行中”字样，在加工时禁止打开安全门	切雕加工
6		加工完成后，激光反射镜回到加工起始点，加工状态显示屏上显示“加工完成”，此时可打开安全门，将加工好的 KT 板材料取出，并按照设计构思进行拼接	取出模型

思考题

1. 电火花加工技术的加工原理及应用场合有哪些？
2. 激光加工技术的加工原理及应用场合有哪些？
3. 电子束加工技术的加工原理及应用场合有哪些？
4. 离子束加工技术的加工原理及应用场合有哪些？
5. 超声加工技术的加工原理及应用场合有哪些？

第五篇

创 新 训 练



第15章　综合与创新训练

教学目的和要求：综合与创新工程训练主要让学生了解综合与创新训练的方法和意义，从项目管理入手，掌握项目需要、项目规划、项目计划、项目分解、项目进度计划安排、责任分派矩阵等；通过项目实例分析掌握典型零件的加工工艺和加工路线，同时培养学生的创新思维和创新精神。



15.1　综合与创新训练概述

15.1.1　综合与创新训练简介

工程训练的教学过程涉及面很广，内容复杂，具有实践性强，与工程实际联系紧密等特点，在培养创新思维能力方面有着其他课不可替代的作用，因此在工程训练中非常适宜对学生进行创新能力的培养。在工程训练中进行综合与创新训练，就是通过有组织有计划的训练形式，在训练过程中构建具有创造性、实践性的学生主体活动形式，通过学生主动参与、主动实践、主动思考、主动探索、主动创造，培养学生的创新意识。

传统的金工实习模式是围绕各个实习工种展开的，且以教师为主体，学生被动地按照他人设计的零件和工艺进行加工，在学生大脑中形成的是孤立和分散的机械加工工艺知识。他们无法对机械加工工艺过程形成系统的和整体的深刻印象，也就难以将工艺知识灵活地运用到生产实践中去解决实际问题。

综合与创新训练是一个全方位培养和提高学生工程素质和创新意识的教学环节，它是将所学知识应用于工艺综合分析、工艺设计和制造过程的一个重要的实践环节，是学生获取分析问题和解决问题能力、创新思维能力、工程指挥和组织能力的重要途径。以学生为主体，学生变被动为主动，按照自己的意愿设计产品，制订加工工艺，通过教师的引导与展示，完成一件产品的整个设计与制造过程。

综合与创新训练的过程主要有：项目管理、产品设计、产品制造工艺开发、加工产品零件和组装成品等环节。在教学目的、内容、工程训练报告等工程训练全过程贯彻创新思维的理念。

15.1.2　综合与创新训练的意义

“创新是一个民族进步的灵魂，是国家兴旺发达的不竭动力”。当今之世，科技创新能力成为国家实力最关键的体现。在经济全球化时代，一个国家具有较强的科技创新能力，就能在世界产业分工链条中处于高端位置，就能创造激活国家经济的新产业，

就能拥有重要的自主知识产权而引领社会的发展。提高大学生的创新精神和创新能力是时代对中国高等教育提出的要求，也是全面提高大学生综合素质能力的重点工作。高校作为我国培养人才的重要场所，关于创新人才的培养工作已经起步，进行了很多探索，在工程训练中进行综合与创新训练，在培养“强责任、精技术、善管理、重实践、求创新”的工程技术人才和管理人才中起着重要的作用。综合与创新训练具体作用如下：

1. 可以锻炼学生的工程实践能力。提高质量、成本、效益、安全等工程素质，培养学生刻苦钻研、一丝不苟、团结协作等优良品质和工作作风，有利于锻炼学生在实践中获取知识的能力，有利于培养高素质的工程技术人才。

2. 可以激发学生的创新思维，培养学生创造性地解决工程实践问题的能力。学生在已掌握的工艺基础知识和操作技能的基础上，按照工程训练动员中老师布置的创新性训练题目，在教师的启发、引导下，把所学到的零散的知识加以综合并灵活的运用，提高分析问题、解决工程实践问题的能力，建立起与生产实践的密切关联。

3. 可以激发学生的工程训练兴趣和创造热情，培养学生的创新能力。工程训练中要求学生独立完成的创新产品要外形美观、工艺合理、经济适用。创新产品完成的过程中，学生既可以采用普通的切削加工技术也可采用现代加工技术，开拓了学生的视野，培养了学生的创新能力，提高工程训练的积极性和主动性，使学生工程训练由被动转变为主动。综合与创新训练计划还为学生创造了与教师密切联系、平等交流与合作的机会和有利的条件，在培养高素质的工程技术人才的过程中具有重要地位和作用。



15.2 项目管理与产品创新

15.2.1 项目管理

在工程训练教学过程中，通常以“项目”为载体开展创新活动，具体包括大学生自主创新项目，以及各类大学生科技创新竞赛项目。因此，在大学生开展科技创新活动时，应当学习必要的项目管理、产品设计及制造等方面的知识。

1. 项目

项目是指一系列独特的、复杂的并相互关联的活动，这些活动有着一个明确的目标或目的，必须在特定的时间、预算、资源限定内，依据规范完成。它在限定可以是一项工程、服务、研究课题及活动等。项目具有以下属性。

2. 项目属性

（1）一次性　一次性是项目与其他重复性运行或操作工作最大的区别。项目有明确的起点和终点，即在限定的时间内完成特定的目标，它没有可以完全照搬的先例，也不会有完全相同的复制。项目的其他属性也是从这一主要的特征衍生出来的。

（2）独特性　每个项目都是独特的。或者其提供的产品或服务有自身的特点；或者其提供的产品或服务与其他项目类似，然而其时间和地点，内部和外部的环境，自然和社会条件有别于其他项目，因此项目的过程总是独一无二的。

（3）目标的确定性　项目必需有确定的目标：

时间性目标：如在规定的时段内或规定的时点之前完成。

成果性目标：如提供某种规定的产品或服务。

约束性目标：如不超过规定的资源限制。

目标的确定性允许有一个变动的幅度，也就是可以修改。不过一旦项目目标发生实质性变化，它就不再是原来的项目了，而将产生一个新的项目。

（4）活动的整体性　项目中的一切活动都是相关联的，构成一个整体。多余的活动是不必要的，缺少某些活动必将损害项目目标的实现。

（5）组织的临时性和开放性　项目班子在项目的全过程中，其人数，成员，职责是在不断变化的。某些项目班子的成员是借调来的，项目终结时班子要解散，人员要转移。参与项目的组织往往有多个，甚至几十个或更多。他们通过协议或合同以及其他的社会关系组织到一起，在项目的不同时段不同程度的介入项目活动。可以说，项目组织没有严格的边界，是临时性的开放性的。这一点与一般企、事业单位和政府机构组织很不一样。

（6）成果的不可挽回性　项目的一次性属性决定了项目不同于其他事情可以试做，作坏了可以重来；也不同于生产批量产品，合格率达 99.99% 是很好的了。项目在一定条件下启动，一旦失败就永远失去了重新进行原项目的机会。项目相对于运作有较大的不确定性和风险。

2. 项目管理

项目管理，就是项目的管理者在有限的资源（人员、技能、方法、工具等）约束下，运用系统的观点、方法和理论，对项目涉及的全部工作进行有效地管理。即从项目的投资决策开始到项目结束的全过程进行计划、组织、指挥、协调、控制和评价，以实现项目的目标。项目管理主要包括以下几方面。

（1）项目需求　一个项目往往需要应对各种不同的需求，有的需求互不相干，甚至相互抵触，需要项目管理者采取一定的步骤和方法，将各种不同的需求进行协调、平衡，从而最终确定项目所要达到的目标。

（2）项目规划　对项目进行前期调查，收集整理相关资料，确定项目的任务，预测项目风险和提出完成项目目标的有效方案、措施和手段，制定初步的项目可行性研究报告。在规划过程中，对项目的有效方案进行反复多次评估、对比，根据项目需求选择最优方案，才能进行项目计划的制定。

（3）项目计划　指导组织、实施、协调和控制项目过程的文件，提高整个项目过程的可控性和执行效率，保障项目的稳定运行。项目计划包括工作分解、项目进度计划、责任分配、项目总结等。

3. 项目工作分解

项目工作分解是为了管理和控制的目的，将项目进行分解的技术。该技术将项目按层次分解为子项目，各层子项目再分解为更容易管理控制的工作单元。

项目工作分解包括以下主要步骤。

（1）确定项目的主要组成部分，例如，工程训练中某制造项目包括设计、制造、检验、包装四大组成部分。

（2）确定每个组成部分的层次直至工作单元，并确定工作内容和可交付成果。例如设计组成部分包括结构设计、外形设计、性能设计、材料选择等工作单元。

（3）确定每个组成部分乃至工作单元能够便于执行和管理，并可进行费用、时间

进度的估算，能够在技术上对成果进行验证和测量。

（4）根据工作分解提供完整的项目工作分解结构图。例如某制造项目的分解结构图，如图 15－1 所示。

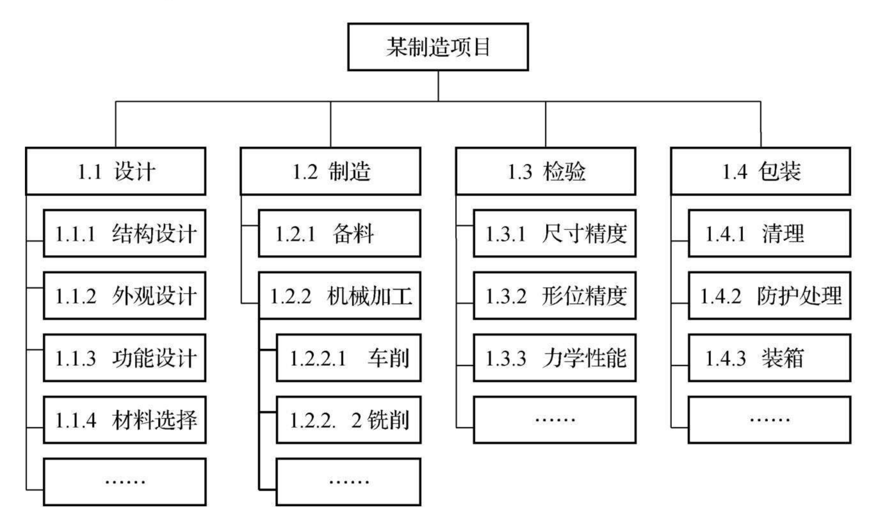


图 15－1　某制造项目的分解结构图

4. 项目进度计划

项目工作分解后，对整个项目乃至工作单元能够估算完成时间，以摘要、表格、图表的形式表示。

（1）网络图 根据项目组成部分及工作单元之间运作的相互关系和先后次序，绘制项目进度网络图，能够直观地表示项目运行关键的线路和重要的节点。网络图如图 15－2 所示。

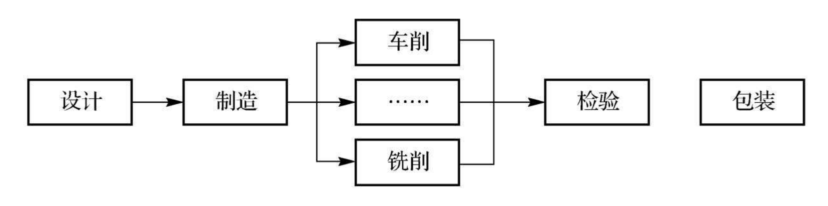


图 15－2　某制造项目网络图

（2）横道图（又称为甘特图）由美国科学管理的先驱亨利·劳伦斯·甘特于 1917 年提出，甘特图能以时间顺序显示所要进行的活动，以及那些可以在同时进行的活动。在图上，项目的每一步在被执行的时间段中用线条标出。例如图 15－3 所示，任务 1 起始时间为×月 1 日至 3 日，工期为 3 天；所有任务于 11 日完成，项目工期为 11 天。

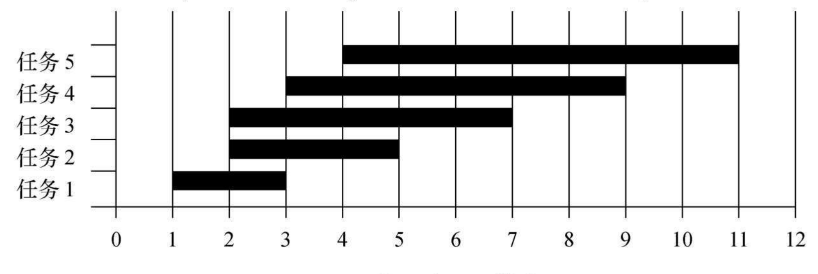


图 15－3　某制造项目横道图

5. 责任分派矩阵

责任分派矩阵与项目工作分解结构图相匹配，规定每个工作单元对应的组织单元应当承担的责任，使责任落实到人。在项目工作分解结构图各层次都可作出对应的责任矩阵，通过责任矩阵可以对人力资源进行估算。表 15－1 为某制造责任分派矩阵示例。

表 15－1　某制造责任分派矩阵

	项目负责人	设计工程师	制造工程师	车工	铣工	其他制造工种	检验工	包装工
设计	PA	DI	A					
制造	P	A	DI	X	X	X		
检验	PA	A					X	
包装	DP	A						XT

注：D-单独决策；P-控制进度；A-可以建议；X-执行工作；I-必须通报；T-需要培训。

6. 项目工作总结报告

项目工作总结报告，通常是对一个项目或项目的一个阶段的总结。总结报告的内容包括项目的背景分析和研究、项目的目标、项目工作分解、项目计划及进度控制、项目质量分析、项目成本分析、结论（项目的成果及经验教训）。

15.2.2　产品设计及产品创新

1. 产品设计

随着科学技术的不断发展，人们对产品的功能要求越来越高，市场对产品的竞争越来越激烈，快速提供优质、廉价、具有创新性的产品已成为企业发展的必由之路。产品的设计是一个决策的过程，从人们的需求出发，形成规划和设计，再形成产品进入市场，经过销售、使用，最终报废或回收。

机械产品设计一般分为产品规划，原理方案设计，技术设计和施工设计 4 个阶段。

（1）产品规划阶段　产品规划，明确设计任务就是决策开发新产品，为新技术系统设定技术过程和边界，是一项创造性的工作。要在集约信息、调研预测的基础上，识别社会的真正需求，进行可行性分析，提出可行性报告以及合理的设计要求和设计参数项目表。同时，产品规划要根据对市场的分析，包括对竞争对手的分析，在概念上进行产品设想，研究产品特性和系统配置，包括市场定位、时间安排，以及按功能、材料、加工方法、质量和成本的要求等对产品进行定义。

集约信息应该是生产单位中包括从情报、设计、制造到社会服务等所有业务部门的任务。调研要从市场、技术、社会三个方面进行。预测要按科学的方法进行。识别需求的可行性分析和可行性报告，应由所有业务部门参加的并行设计组和用户共同完成，而不是设计部门或少数部门完成。

（2）原理方案设计阶段　原理方案设计就是新产品的功能原理设计。用系统化设计法将确定了的新产品总功能按层次分解为分功能直到功能元。用形态学矩阵组合按不同方法求得的各功能元的多个解，得到技术系统的多个功能原理解。经过必要的原

理试验，通过评价决策，寻求其中的最优解即新产品的最优原理方案，列表给出原理参数，并做出新产品的功能原理方案图。

（3）技术设计阶段　技术设计是把新产品的最优原理方案具体化。首先是总体设计，按照“人-机-环境-社会”的合理要求，对产品各部分的位置、运动、控制等进行总体布局。然后分为同时进行的实用化设计和商品化设计两条设计路线，分别经过结构设计（材料、尺寸等）和造型设计（美感、宜人性等）得到若干个结构方案和外观方案。分别经过试验和评价，得到最优结构方案和最优造型方案。最后分别得出结构设计技术文件、总体布置草图、结构装配草图和造型设计技术文件、总体效果草图、外观构思模型。以上两条设计路线的每一步骤，都经过交流互补，而不是完成了结构设计再进行造型设计，最后完成的图纸和文件所表示的是统一的新产品。

产品的设计开发可根据企业自身经济和技术条件，进行拥有自主知识产权的产品开发、集多家单位优势的协作开发，也可以通过技术引进和消化吸收再创造等方式。

（4）施工设计阶段　施工设计是把技术设计的结果变成施工的技术文件。一般来说，要完成零件工作图、部件装配图、造型效果图、设计和使用说明书、设计和工艺文件等。再由制造部门确定哪些零件由自己制造，哪些零件需要外购，选择零件加工方法以及组装成产品的整个生产计划，同时根据生产计划进行零件加工和产品组装等过程。

2. 产品创新

什么是创新？简单地说，就是利用已存在的自然资源或社会要素创造新的矛盾共同体的人类行为，可以认为是对旧有的一切所进行的替代或者覆盖。

（1）创新思维

创新思维是指对事物间的联系进行前所未有的思考，从而创造出新事物、新方法的思维形式。人类思维具有三种形式：逻辑思维、形象思维和创新思维。钱学森指出：“思维学是研究思维过程和思维结果，不管在人脑中的过程。这样我从前提出的形象（直感）思维和灵感（顿悟）思维实质是一个，即形象思维，灵感、顿悟都是不同大脑状态中的形象思维。另外，人的创造需要把形象思维的结果再加逻辑论证，是两种思维的辩证统一，是更高层次的思维，应取名为创造性思维，这是智慧之花！所以（应）归纳为逻辑思维、形象思维和创造性思维。”钱学森所说的创造性思维就是创新思维。由此可见，创新思维是建立在逻辑思维和形象思维基础之上的。下面介绍几种思维类型。

1）形象思维和抽象思维：形象思维使用反映同类事物一般外部特征的形象，基本由右脑进行。抽象思维使用反映事物本质属性的概念和推理，基本由左脑进行。形象思维较活跃，能激发联想、类比、幻想等，产生创新构思。抽象思维较严密，在新的条件下，也可通过逻辑推理产生创新构思。两种思维通过连接左、右脑互相作用、相互渗透，二者结合能产生更多的创新成果。

2）发散思维和收敛思维：发散思维遇到问题，是根据问题的信息，沿着非常规的不同的正向、逆向、全方向思维和角度多方面寻求可能的解答。收敛思维是把来自多方面的知识信息指向同一问题，通过分析综合，逻辑推理，引出答案。发散思维的特点是：流畅，反应敏捷，在较短时间内想出多种方案；灵活，触类旁通，随机应变，不受心理定势影响；独特，所提的解决方案有特色。发散思维要求熟悉多方面的科技文化领域，知识面广博。收敛思维的特点是：分析比较各种信息的优缺点，推理综合，引出最优答案。收敛思维要求具有细致的分析能力和严密的逻辑推理能力。两种思维

结合，通过多次发散、收敛的循环，能找到较好的创新方案。

3）逻辑思维和非逻辑思维：逻辑思维注意事物的显性质和常规功能，应用抽象概念，把复杂问题化简，找出主要因素。非逻辑思维不严格遵循逻辑程式，灵活自由，往往能突破常规，引发事物的潜在性质和特殊功能，产生新颖独创的构思，逻辑思维要求善于分解事物，在此基础上进行综合、归纳、演绎、推理的能力。非逻辑思维的基本形式是：由一事物引发，想到常规中似乎完全无关的另一事物的联想力；加工改造原有形象，产生新形象的想象力；受激直接领悟事物本质的洞察力；在偶然机遇使人着迷于问题时的全部积极心理活动突然连锁激发、不能控制，潜意识进入显意识，爆发出创新火花的灵感。

4）直达思维和旁通思维：直达思维在思考解决问题时，始终不脱离问题的情境和要求。旁通思维通过细致分析，把问题转换成另一领域的等价问题。直达思维解决较简单的问题特别有效。旁通思维抓住问题的本质，通过类比、置换、模拟等方法创造新构思新方案。两种思维往往先使用直达思维无效，才改用旁通思维，但又回归到直达思维，面对问题提出创新方案。

（2）产品创新方法

目前产品的创新主要体现在产品功能创新和产品品种创新两个方面，就其创新理论和方法而言主要包括以下几种。

1）头脑风暴法　头脑风暴法也称集体创造性思考法，其实质就是召开一种特殊形式的小组会，在小组会上广泛地征集想法和建议，然后加以充分讨论，鼓励提出创意，最后再进行分析研究以及决策。

2）逆向思考法　逆向思考法亦称破除法或反头脑风暴法。其出发点是认为任何产品都不可能十全十美，总会存在缺陷，可以加以改进，提出创新构想。逆向思考法的关键是要具有一种“吹毛求疵”的精神，善于发现现有产品的问题。

3）科学创造法　科学创造法也称综摄法。综摄法是利用非推理因素通过召开一种特别会议来激发创造力的一种创新方法。综摄法的基本特点是，为了拓宽思路，获得创新构想，就应经过一个“变陌生为熟悉”而后“变熟悉为陌生”的过程，即在一段时间内暂时抛开原问题，通过类比探索从而得到启发。

4）戈登法　戈登法又称教学式头脑风暴法。其特点是不让与会者直接讨论问题本身，而只让讨论问题的某一局部或某一侧面；或者讨论与问题相似的某一问题；或者用“抽象的阶梯”把问题抽象化向与会者提出。主持人对提出的构想加以分析研究，一步步地将与会者引导到问题本身上来。

5）检验法　检验法亦称为检验表法或提问清单法。所谓检验表是指为了准确地把握创新的目标与方向，既能开拓思路、启发想象力，又能避免泛泛地随意思考，而设计的一份系统提问的清单。奥斯本设计出了一种适用于新产品开发的检验表，称为“奥斯本 6M 法则”。

6）属性列举法　属性列举法也称为分布改变法，特别适用于老产品的升级换代。其特点是将一种产品的特点列举出来，制成表格，然后再把改善这些特点的事项列成表。其特点在于能保证对问题的所有方面作全面的分析研究。

7）仿生学法　仿生学法是通过模仿某些生物的形状、结构、功能、机理以及能源和信息系统，来解决某些技术问题的一种创新技术。

8）形态学分析法　形态学分析法又称形态方格法。它研究如何把问题所涉及的所有方面、因素、特性等尽可能详尽地罗列出来，或者把不同因素联系起来，通过建立

一个系统结构来求得问题的创新解决方案。形态学分析法认为创新并非全是新的东西，可能是旧东西的创新组合。因而，如能对问题加以系统的分析和组合，便可大大提高创新成功的可能性。

（3）TRIZ 理论

创新从最通俗的意义上讲就是创造性地发现问题和创造性地解决问题的过程，TRIZ 理论的强大作用正在于它为人们创造性地发现问题和解决问题提供了系统的理论和方法工具。现代 TRIZ 理论的核心思想主要体现在三个方面。首先，无论是一个简单产品还是复杂的技术系统，其核心技术的发展都是遵循着客观的规律发展演变的，即具有客观的进化规律和模式。其次，各种技术难题、冲突和矛盾的不断解决是推动这种进化过程的动力。再次是技术系统发展的理想状态是用尽量少的资源实现尽量多的功能。

现代 TRIZ 理论体系主要包括以下几个方面的内容。

1）创新思维方法与问题分析方法　TRIZ 理论中提供了如何系统分析问题的科学方法，如多屏幕法等；而对于复杂问题的分析，则包含了科学的问题分析建模方法——“物-场”分析法，它可以帮助快速确认核心问题，发现根本矛盾所在。

2）技术系统进化法则　针对技术系统进化演变规律，在大量专利分析的基础上 TRIZ 理论总结提炼出八个基本进化法则。利用这些进化法则，可以分析确认当前产品的技术状态，并预测未来发展趋势，开发富有竞争力的新产品。

3）技术矛盾解决原理　不同的发明创造往往遵循共同的规律。TRIZ 理论将这些共同的规律归纳成 40 个创新原理，针对具体的技术矛盾，可以基于这些创新原理、结合工程实际寻求具体的解决方案。

4）创新问题标准解法　针对具体问题的物-场模型的不同特征，分别对应有标准的模型处理方法，包括模型的修整、转换、物质与场的添加等等。

5）发明问题解决算法 ARIZ　主要针对问题情境复杂，矛盾及其相关部件不明确的技术系统。它是一个对初始问题进行一系列变形及再定义等非计算性的逻辑过程，实现对问题的逐步深入分析，问题转化，直至问题的解决。

6）基于物理、化学、几何学等工程学原理而构建的知识库　基于物理、化学、几何学等领域的数百万项发明专利的分析结果而构建的知识库可以为技术创新提供丰富的方案来源。

TRIZ 理论与传统的创新方法比较具有的特点优势：

相对于传统的创新方法，比如试错法，头脑风暴法等，TRIZ 理论具有鲜明的特点和优势。它成功地揭示了创造发明的内在规律和原理，着力于澄清和强调系统中 存在的矛盾，而不是逃避矛盾，其目标是完全解决矛盾，获得最终的理想解，而不是采取折衷或者妥协的做法，而且它是基于技术的发展演化规律研究整个设计与开 发过程，而不再是随机的行为。实践证明，运用 TRIZ 理论，可大大加快人们创造发明的进程而且能得到高质量的创新产品。它能够帮助我们系统的分析问题情境，快速发现问题本质或者矛盾，它能够准确确定问题探索方向，突破思维障碍，打破思维定势，以新的视觉分析问题，进行系统思维，能根据技术进化规律预测未来发展趋势，帮助我们开发富有竞争力的新产品。

15.2.3　产品制造工艺

1. 毛坯的选择

毛坯是指根据零件（或产品）所需要的形状、工艺尺寸等要素，制造出的为进一步加工做准备的加工对象。机械零件的毛坯多数由铸、锻、焊、冲压等方法制成，然后再经切削加工制成合格零件，装配成机器。如果为了减少机械加工余量，降低机械加工成本，对选择的毛坯质量要求过高，就会使毛坯的制造成本提高，因此毛坯的种类和制造方法与机械加工是相互影响的，所以，应合理地选择毛坯的种类，合理地选择机械加工方法。

（1）毛坯的种类

目前，在机械加工中，毛坯的种类很多，有型材、铸件、锻件、焊件以及冷冲压件和粉末冶金件等。

1）型材 是铁或钢以及具有一定强度和韧性的材料（如塑料、铝、玻璃纤维等）通过轧制，拉制、挤出，铸造等工艺制成的具有一定几何截面的物体。轧制的型材组织致密、力学性能较好。热轧型材尺寸较大，精度较低，多用于一般零件的毛坯；冷拉型材尺寸较小，精度较高，易实现自动送料，适用于毛坯精度要求较高的中小型零件。

2）铸件 受力不大或以承受压应力为主的形状复杂的零件毛坯，宜采用铸造方法制造。目前生产中的铸件大多数是用砂型铸造的，少数尺寸较小和精度较高的铸件可以采用特种铸造。砂型铸造的铸件精度较低，加工余量相应也比较大。砂型铸造对金属材料的选择没有限制，应用最多的是铸铁。

3）锻件 锻件是金属被施加压力，通过塑性变形塑造要求的形状或合适的压缩力的零件。锻件过程建造了精致的颗粒结构，并改进了金属的物理属性。锻件需要每片都是一致的，没有任何多孔性、内含物或其他的瑕疵。这种方法生产的元件，强度与重量比有一个高的比率。

4）焊接件 焊接件是将型材或经过局部加工后的半成品用焊接的方法连接成一个整体，也称组合毛坯。焊接件的尺寸、形状一般不受限制，制造周期也比锻件和铸件短得多。

（2）毛坯的选择

毛坯是根据零件所要求的形状、尺寸等制成的供进一步加工用的生产对象。毛坯的种类、形状、尺寸及精度对机械加工工艺过程、产品质量、材料消耗和生产成本有着直接的影响。选择毛坯应在满足使用要求的前提下，尽量降低生产成本，在选择毛坯过程中，应全面考虑下列因素。

1）零件的材料及其机械性能　零件的材料大致确定了毛坯的种类。例如，铸铁和青铜零件用铸造毛坯；钢质零件当形状不复杂且机械性能要求不高时常用型材，机械性能要求高时宜用锻件。

2）零件的结构形状和外形尺寸　例如，阶梯轴零件各台阶直径相差不大时可用棒料，相差较大时宜用锻件；外形尺寸大的零件一般用自由锻件或砂型铸造毛坯，中小型零件可用模锻件或特种铸造毛坯。

3）生产类型　大批量生产时应采用精度和生产率都较高的毛坯制造方法。铸件应采用金属型铸造，锻件应采用模锻或精密锻造；单件小批生产则应采用手工铸造或自由锻造。

4）毛坯车间的生产条件　必须结合现有生产条件来确定毛坯。

5）利用新工艺、新技术、新材料的可能性：例如，采用精密铸造、精锻、冷轧、

冷挤压、粉末冶金、异型钢材及工程塑料等。

（3）确定毛坯的形状

为了减少机械加工工作量和节约金属材料，毛坯应尽可能接近零件形状。最终确定的毛坯形状除了取决于零件形状、各加工表面总余量和毛坯种类外，还应考虑是否需要制出工艺凸台以利于工件的装夹；是一个零件制成一个毛坯还是多个零件合制成一个毛坯；哪些表面不要求制出（如孔、槽、凹坑等）；铸件分型面、拔模斜度及铸造圆角；锻件敷料、分模面、模锻斜度及圆角半径等。

2. 产品制造的工艺过程

生产过程中逐渐改变生产对象的性质、形状、尺寸及相对位置，使其成为成品的过程称为工艺过程。产品总的工艺过程又可具体分为铸造、锻压、焊接、机械加工、热处理和装配等加工工艺过程。加工工艺过程在产品生产过程中具有重要地位。通过这个过程使原材料逐渐成为产品。

（1）工艺规程

零件依次通过的全部加工过程称为工艺路线或工艺流程。全部工艺过程按一定的格式形成的文件称为工艺规程。工艺规程常表现为各种形式的工艺卡片，在其中简明扼要地写明与该零件相关的各种信息，如工艺路线、加工设备、刀具和量具的配备、加工用量和检验方法等。

（2）工艺过程的组成

一般较为复杂的零件往往用不同的设备和方法逐步完成，这个工艺过程又由许多工序、工步和走刀等组成。

1）工序　一个（或一组）工人，在一个工作地点，对同一个（或同时几个）工件连续完成的工艺过程。工序是组机械加工工艺过程的基本单元，又是制定生产计划、生产组织和进行生产成本核算的基本单元。

2）安装　工件在机床或夹具中定位并夹紧的过程，在同一工序中，工件可能只需要安装一次，也可能需要安装几次。在加工过程中，应尽量减少安装次数，因为这样不仅可以减少辅助时间，而且可以减少因安装误差而导致的加工误差。

3）工位　为减少工序中的安装次数，常常采用各种移动或转动工作台、回转夹具或移动夹具，使工件在一次安装中可以先后在机床上占有不同的位置，进行连续加工。为了完成一定的工序内容，一次安装工件后，工件与夹具或设备的可动部分相对刀具或设备的固定部分所占据的每一个位置上所完成的工艺过程称为工位。

4）工步　在加工表面、加工工具、转速和进给量都不变的情况下，连续完成的工序部分。一个工序可以包括几个工步，也可以只包括一个工步。

5）走刀　在一个工步内，若被加工表面要切去的金属层很厚，需要分几次切削，则每进行一次切削所完成的那部分工艺过程称为一次走刀。一个工步可包括一次或几次走刀。

3. 加工工艺与成本

机器零件的结构形状尽管多种多样，但均由一些基本表面组成，每一种表面又有许多加工方法。正确选择加工方法，对保证质量、提高生产率和降低成本有着重要意义。

选择加工方法时，不但要了解加工方法所能达到的加工精度和表面粗糙度，还应当了解加工精度、表面粗糙度与加工成本之间的关系。统计资料表明，任何一种加工

方法，其加工误差与加工成本之间的关系大致符合图 15－4（a）所示的曲线。图中 A 点所对应的成本，是保证加工质量应该付出的最高成本；B 点所对应的是必须付出的最低成本。由图 15－4 中可以看出，在 A 点以左，要提高一点加工精度（即减少一点加工误差），加工成本陡增；在 B 点以右，即便降低对工件的精度要求，而生产成本却降低甚少，甚至不降低。AB 段所对应的精度范围是最经济的加工精度。表面粗糙度与加工费用之间的关系如图 l5－4（b）所示，在 B 点以右，提高表面粗糙度导致加工费用成倍增长，在 A 点以左，降低表面粗糙度，加工费用降低很少，AB 段所对应的表面粗糙度加工范围是最经济的范围。产品加工质量受诸多因素的影响，在满足使用性能要求的前提下，必须兼顾工艺上的可能性和经济上的合理性。

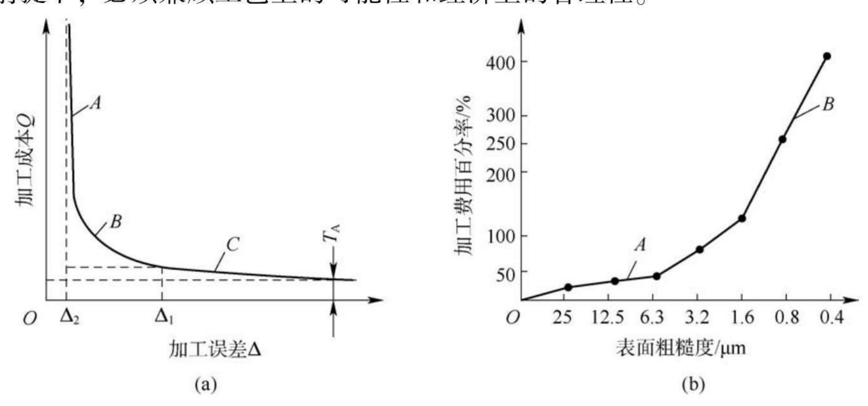


图 15－4　加工精度与成本关系图

4. 典型表面的加工路线

在长期生产实践中，对机械零件的各种不同要求的典型表面，如外圆、内孔、平面等，形成了若干行之有效的加工路线，可供设计工艺过程时参考。

（1）外圆表面的加工路线

图 15－5 给出了外圆表面的典型加工路线，以及路线中各工序所能达到的精度和粗糙度。这些路线可概括成四条基本路线。

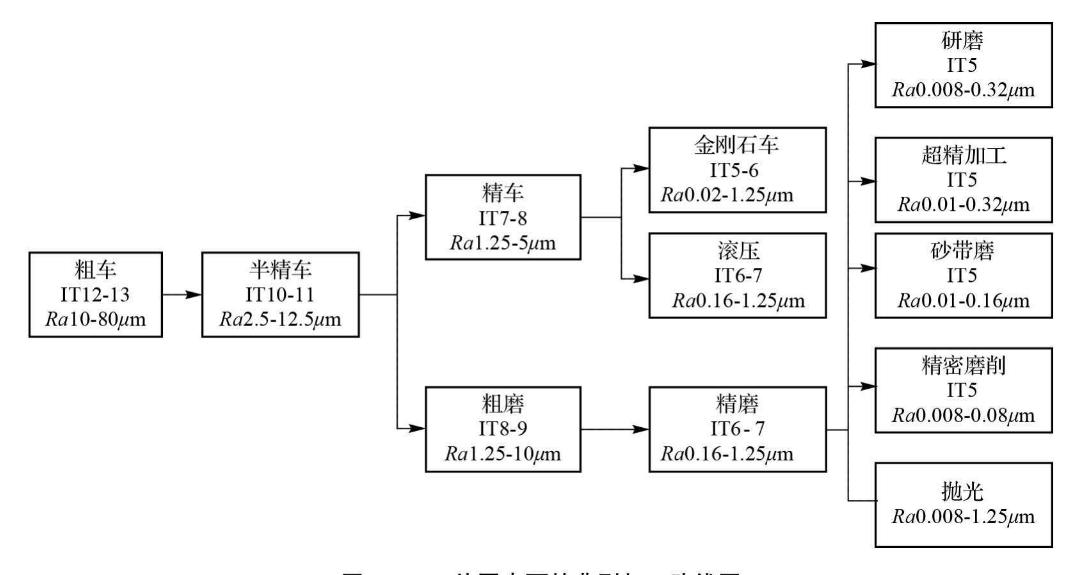


图 15－5　外圆表面的典型加工路线图

1）粗车-半精车-精车。这是应用最广泛的一条工艺路线。只要工件材料可以进行切削加工，精度要求不高于IT7、粗糙度 *Ra* 不小于0.8μm的零件表面，均可采用此加工路线。如果精度要求较低，可只取到半精车，甚至只取到粗车。

2）粗车-半精车-粗磨-精磨。此工艺路线主要用于加工黑色金属材料，特别是结构钢零零件和半精车后有淬火要求的零件。表面精度要求不高于IT6、粗糙度 *Ra* 值不小于0.16μm的外圆表面，均可安排此工艺路线。

3）粗车-半精车-粗磨-精磨-光整加工。若采用第二条工艺路线仍不能满足精度，尤其是粗糙度的要求时，可采用此工艺路线，即在精磨以后增加一道光整加工工序。常用的光整加工方法有研磨、超精加工、砂带磨削、精密磨削以及抛光等。

（2）孔的加工路线

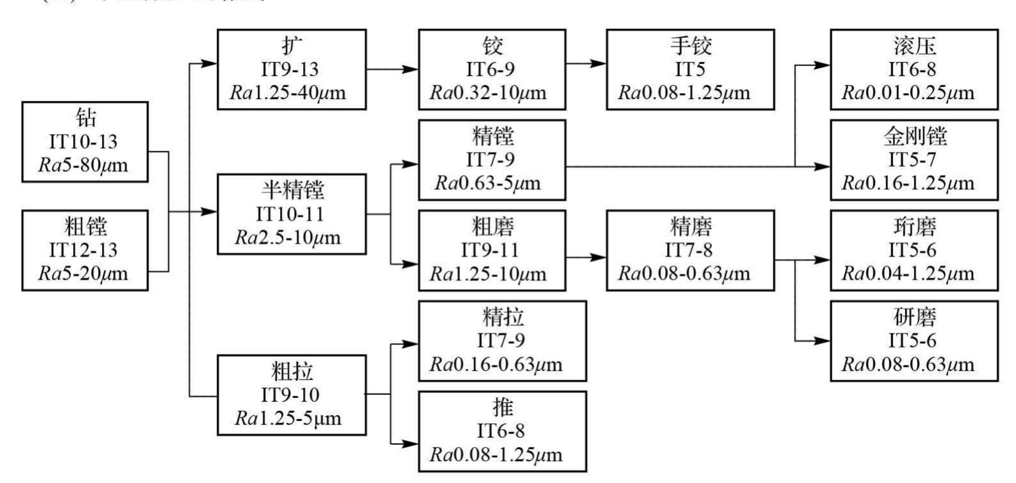


图15-6　是孔的典型加工路线

图15-6是孔的典型加工路线框图，可把它归纳为以下四条基本加工路线。1）钻（粗镗）-粗拉-精拉。此加工路线多用于大批量生产中加工盘套类零件的圆孔、单键孔和花键孔。加工出的孔的尺寸精度可达IT7，且加工质量稳定，生产率高。当工件上无铸出或锻出的毛坯孔时，第一道工序安排钻孔；若有毛坯孔，则安排粗镗孔；如毛坯孔的精度好，也可直接拉孔。

2）钻-扩-铰。此工艺路线主要用于直径小于50 mm的中小型孔加工，是一条应用最为广泛的加工路线，在各种生产类型中都有应用。加工后孔的尺寸精度通常达IT6-8，表面糙度 *Ra* 为0.8~3.2μm。若尺寸、形状精度和粗糙度要求还要高，可在铰孔后安排一次手铰。由于铰孔加工对孔的位置误差的纠正能力差，因此孔的位置精度主要由钻-扩来保证。位置精度要求高的孔不宜采用此加工方案。

3）钻（粗镗）-半精镗-精镗-浮动镗（或金刚镗）。这也是一条应用非常广泛的加工路线，在各种生产类型中都有应用。用于加工未经淬火的黑色金属及有色金属等材料的高精度孔和孔系。与钻-扩-铰工艺路线不同的是：所能加工的孔径范围大，一般孔径不小于18 mm即可采用装夹式镗刀镗孔；加工出的孔位置精度高，如金刚镗多轴镗孔，孔距公差可控制在±0.005 -±0.01 mm，常用于加工位置精度要求高的孔或孔系，如连杆大小头孔、机床主轴箱孔系等。一般有色金属零件上直径较小的单个孔采用金刚镗，直径较大的孔及孔系采用浮动镗。不管用哪种方法，都要求精镗达到一定的精度。

4）钻（粗镗）-半精镗-粗磨-精磨-研磨（或珩磨）。这条工艺路线用于黑色金属

特别是淬硬零件的高精度的孔加工。

（3）平面加工路线

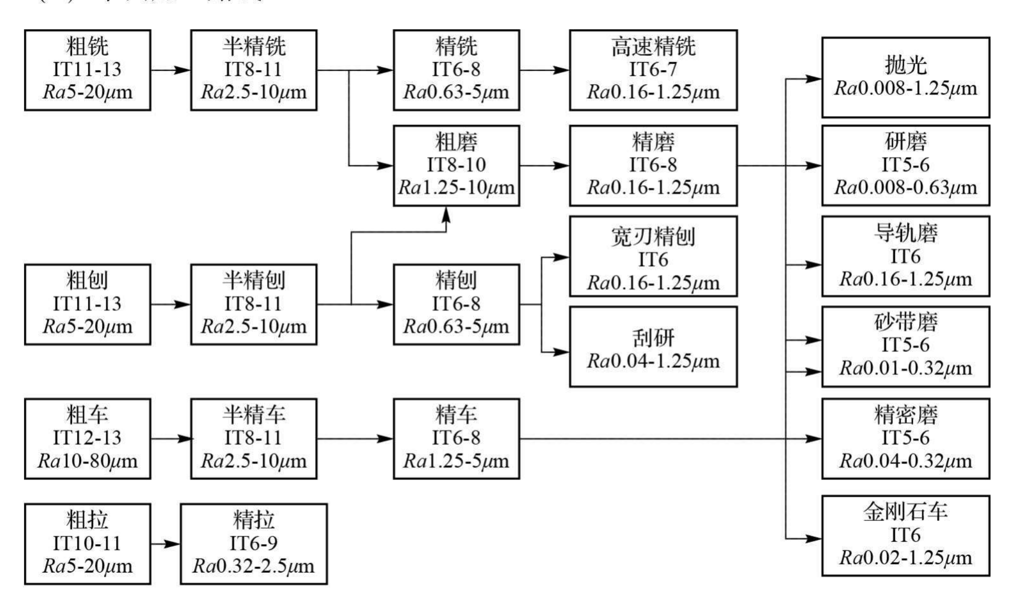


图 15－7　常见平面加工路线

图 15－7 为常见平面加工路线图，可概括为五条基本工艺路线。　1）粗铣-半精铣-精铣-高速精铣。铣削是平面加工中用得最多的方法。若采用高速精铣作为终加工，不但可达到较高的精度，而且可获得较高的生产率。

2）粗刨-半精刨-精刨-宽刃精刨或刮研。此工艺路线以刨削加工为主。通常，刨削的生产率较铣削低，但机床运动精度的调整以及刨刀的刃磨和调整容易，因此目前在单件小批生产，特别在重型机械生产中还得到广泛的应用。

3）粗铣（刨）-半精铣（刨）-粗磨-精磨-研磨、精密磨、砂带磨或抛光。此工艺路线主要用于淬硬表面或高精度表面的加工，淬火工序可安排在半精铣（刨）后。

4）粗拉-精拉。这是一条适合于大批量生产的加工路线，主要特点是生产率高，特别是对台阶面或有沟槽的表面，优点更为突出。

5）粗车-半精车-精车-金刚石车。此加工路线主要用于有色金属零件的平面加工，这些零件有时就是外圆或内孔的端面。如果是黑色金属，则在精车以后安排精磨、砂带磨等工序。



15.3　综合与创新训练实例

综合与创新训练以全国大学生工程训练综合能力竞赛项目为实例介绍项目如何在实践过程中应用创新方法、进行项目管理及制造工艺的选择及安排。

15.3.1　项目介绍

竞赛命题为：以重力势能驱动的具有方向控制功能的无碳小车（如图 15－8 所示）。

设计一种小车，驱动其行走及转向的能量是根据能量转换原理，由给定重力势能

转换来的。给定重力势能为 4 焦耳（取 $g = 10\text{m/s}^2$），竞赛时使用组委会统一提供的质量为 1kg 的重块铅垂下降来获得，落差 400±2mm，重块落下后，须被小车承载并同小车一起运动，不允许从小车上掉落。

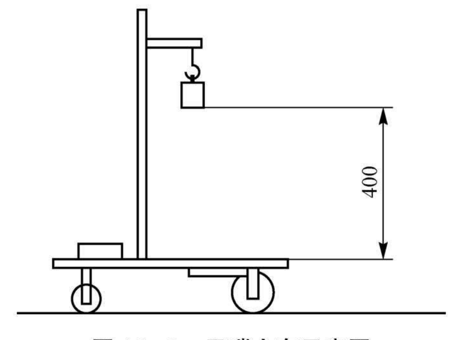


图 15－8　无碳小车示意图

要求小车行走过程中完成所有动作所需的能量均由此重力势能转换获得，不可使用任何其他的能量来源。

要求小车具有转向控制机构，且此转向控制机构具有可调节功能，以适应放有不同间距障碍物的竞赛场地。

要求小车为三轮结构，具体设计、材料选用及加工制作均由参赛学生自主完成。

15.3.2　项目管理

1. 预期成果

设计制造一台符合命题要求的小车，该小车绕行障碍数≥30 个，设计制作工期 3 个月，成本控制在 800 元。

2. 项目组织管理

根据竞赛命题要求，项目由 3 人团队完成，按照项目负责制的要求组建项目组，A 同学任组长，负责项目的组织实施，统筹项目的计划、人力资源、经费、采购及质量管理及小车总体设计。B 同学负责项目的计划工作、零件的单元设计、工艺设计、技术文件的编制及快速成型零件的制作；C 同学负责经费管理、机械加工零件的制作，小车的装配、调试。在项目实施过程中负责的同学负责项目的落实，其余同学配合相工作。

3. 项目工作分解

结合项目组成具体情况，按照构成要素对项目进行任务分解，无碳小车制作项目分解结构图如 15－9 所示。

4. 项目进度计划

结合项目的实际情况及同学们经验的不足，小车项目调试过程为项目难点，在调试过程中如果零件达不到设计要求可能会涉及重新设计，所以调式的时间定为 1 个月，项目的进度计划表如表 15－1 所示。

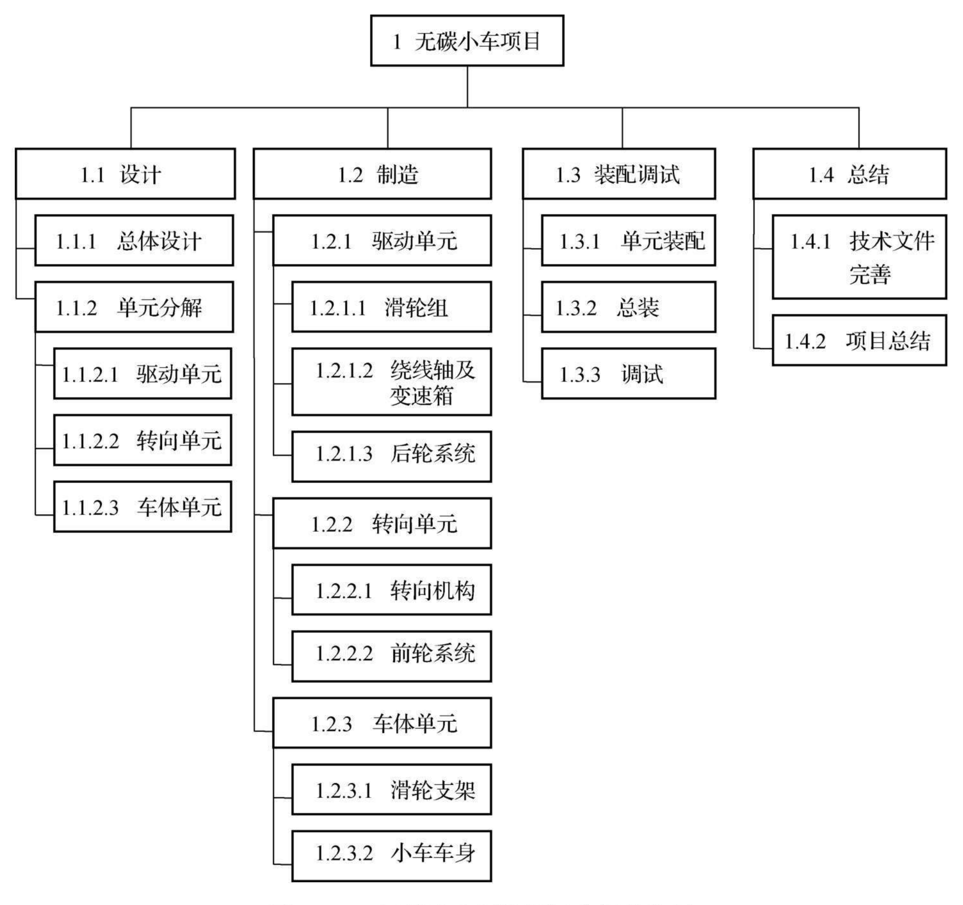


图 15－9　无碳小车制作项目分解结构图

表 15－1　无碳小车项目的进度计划

项目编号	项目名称	工期	完成时间	6月	7月	8月
1	无碳小车	90	8月30日			
1.1	设计	45	7月15日			
1.1.1	总体设计	10	6月10日			
1.1.2	单元设计	35	7月15日			
1.1.2.1	驱动单元	20	7月10日			
1.1.2.2	转向单元	25	7月15日			
1.1.2.3	车体单元	15	6月25日			
1.2	制造	10	7月25日			
1.2.1	驱动单元	10	7月25日			
1.2.1.1	滑轮组	3	7月23日			
1.2.1.2	绕线轴及变速箱	4	7月25日			
1.2.1.3	后轮系统	3	7月23日			
1.2.2	转向系统	10	7月25日			
1.2.2.1	转向机构	6	7月25日			
1.2.2.2	前轮系统	4	7月23日			
1.2.3	车体单元	5	7月25日			
1.2.3.1	滑轮支架	4	7月23日			
1.2.3.2	小车车身	4	7月25日			
1.3	装配调试	33	8月28日			
1.3.1	单元装配	2	7月27日			
1.3.2	总装	1	7月29日			
1.3.4	调试	30	8月27日			
1.4	总结	20	8月30日			
1.4.1	技术文件完善	20	8月29日			
1.4.2	项目总结	2	8月29日			

5. 责任分派矩阵

结合项目进度及项目组成员的知识结构特点按照项目分解结构图进行责任分配，各成员完成分配任务，并配合其他成员完成协助任务，如表 15－2 所示。

表 15－2　无碳小车项目责任分派矩阵

编号	WBS	项目负责人（A）	计划（B）	经费（C）	设计			制造			装配调试	总结
					A	B	C	A	B	C		
1.1	设计	DP	DI	DI								
1.1.1	总体设计	PA	DI	DI	X	A	A					
1.1.2	单元设计	PA	DI	DI								
1.1.2.1	驱动单元	PA	DI	DI	X	A	A					
1.1.2.2	转向单元	PA	DI	DI	A	X	A					
1.1.2.3	车体单元	PA	DI	DI	A	A	X					
1.2	制造	PA	DI	DI								
1.2.1	驱动单元	PA	DI	DI				A	XA	XA		
1.2.1.1	滑轮组	PA	DI	DI				A	XA	XA		
1.2.1.2	绕线轴及变速箱	PA	DI	DI				A	XA	XA		
1.2.1.3	后轮系统	PA	DI	DI				A	XA	XA		
1.2.2	转向系统	PA	DI	DI				A	XA	XA		
1.2.2.1	转向机构	PA	DI	DI				A	XA	XA		
1.2.2.2	前轮系统	PA	DI	DI				A	XA	XA		
1.2.3	车体单元	PA	DI	DI				A	XA	XA		
1.2.3.1	滑轮支架	PA	DI	DI				A	XA	XA		
1.2.3.2	小车车身	PA	DI	DI				A	XA	XA		
1.3	装配调试	PA	DI	DI							X	
1.3.1	单元装配	PA	DI	DI							X	
1.3.2	总装	PA	DI	DI							X	
1.3.3	调试	PA	DI	DI							XA	
1.4	总结	PA	DI	DI								XA
1.4.1	技术文件完善	PA	DI	DI								XA
1.4.2	项目总结	PA	DI	DI								XA

注：D-单独决策；P-控制进度；A-可以建议；X-执行工作；I-必须通报。

15.3.3　主要零件制作工艺分析

在无碳小车制作过程中，其主要零件主要由轴类零件、叉架类零件、盘盖类零件组成。其中轴类零件包括绕线轴、驱动轴，转向轴以及减速器的支撑轴等；叉架类零

件主要包括轴承座，转向拨叉等；盘盖类零件主要由轮子、底板、转向凸轮等组成。各类零件的加工工艺如下。

1. 轴类零件

无碳小车制作属于单件小批量生产，在毛坯材料的选择上已选型材为主，选择合适直径的圆钢或铝棒为宜。加工精度 IT7、粗糙度 Ra 0.8μm 已经能够满足设计需要，所以零件加工工艺路线选择“粗车-半精车-精车”这条应用最广泛的一条工艺路线。在加工过程中为达到特定的加工性能，路线中间可以加上适当的热处理工艺。

2. 叉架类零件

叉架类零件在小车中主要起支撑轴承的作用，因无碳小车承受载荷较小，可直接选用板材作为毛坯。在加工工程中，其不涉及传动精度的外轮廓及镂空减重部分可直接采用粗铣工艺完成。涉及安装定位的表面采用粗铣-半精铣-精铣的加工工艺路线，使其达到加工精度 IT6-8，表面粗糙度 *Ra*0.63~5μm，以满足安装定位需求。对于涉及传动精度的孔系可采用“钻孔-粗镗-精镗”的加工工艺，对于不便于镗削加工的小孔可采用“钻孔-扩孔-铰孔”的加工工艺，以满足加工精度及表面粗糙度。

3. 盘盖类零件

对于盘盖类零件如车身，常采用板材做毛坯，根据需要进行加工，对于精度要求不高的表面可采用粗铣-半精铣的工艺完成加工，对于定位的表面采用粗铣-半精铣-精铣的加工工艺路线，使其达到加工精度 IT6-8，表面粗糙度 *Ra*0.63~5μm，以满足安装定位需求。对于车身上的螺纹孔系常采用“钻孔-扩孔-攻螺纹”的加工工艺满足要求。对于车身上的定位孔常采用“钻孔-扩孔-铰孔”的工艺来满足精度要求，如有更高的要求还可以在铰孔工艺后加上手铰工艺以获得更高的加工精度。

15.3.4 项目总结

项目工作总结，通常是对无碳小车项目设计制作过程梳理，结合项目的背景分析和研究、项目的目标、项目工作分解、项目计划及进度控制、项目质量分析、项目成本分析、项目取得成果及经验教训分阶段进行总结，重点分析项目管理过程及小车设计、零件制作、装配调试中的经验教训，为以后的学习及工作奠定基础。

思考题

1. 什么是项目管理，其主要内容有哪些？
2. 产品创新的方法哪些？
3. 外圆、孔、平面的加工路线如何定制？



参考文书目

[1] 傅水根，李双寿．机械制造实习．北京：清华大学出版社，2009

[2] 傅水根．机械制造工艺基础．北京：清华大学出版社，2004

[3] 王志海，舒敬萍，马晋．机械制造工程实训及创新教育［M］．北京：清华大学出版社，2014

[4] 陈作炳，马晋．工程训练教程．北京：清华大学出版社，2010

[5] 郭永环，姜银方．工程训练．北京：北京大学出版社，2014

[6] 张木青，于兆勤．机械制造工程训练，华南理工大学出版社，2007

[7] 金禧德．金工实习．北京：高等教育出版社，2014

[8] 陈君若．制造技术工程实训，机械工业出版社，2003 年

[9] 王运炎．机械工程材料．北京：机械工业出版社，2009

[10] 陈君若．制造技术工程实训．机械工业出版社．2003

[11] 朱企业．激光精密加工．北京：机械工业出版社，1990

[12] 王家金．激光加工技术．北京：中国计量出版社，1992

[13] 孔庆华．特种加工．上海：同济大学出版社，1997

[14] 张彦敏，贺俊光，张学宾．锻造工工作手册．北京：化学工业出版社，2009

[15] 胡家秀，陈峰．机械创新概论．北京：机械工业出版社，2009

[16] 闻邦椿．机械手册（第 5 版）．北京：机械工业出版社，2010

[17] 洪松涛，彭华．简明焊工手册（第 4 版）．上海：上海科学技术出版社，2015

[18] 翟瑞波．数控铣床/加工中心编程与操作实例．北京：机械工业出版社，2012